

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Tomáš Krupa

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky**

**Vícezdrojový záložní napájecí systém s fotovoltaickým panelem
řízený mikrokontrolérem**

**Multi-source Backup Power System with Photovoltaic Panel
Controlled by a Microcontroller**

2017

Bc. Tomáš Krupa

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Krupa**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 2612T003 Aplikovaná elektronika
Téma: **Více zdrojový záložní napájecí systém s fotovoltaickým panelem řízený mikrokontrolérem**
Multi-source Backup Power System with Photovoltaic Panel Controlled by a Microcontroller

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický rozbor možností nabíjení akumulátoru ze solárních panelů.
2. Navrhněte zapojení vícezdrojového záložního napájecího systému s fotovoltaickým panelem.
3. Realizujte vícezdrojový záložní napájecí systém s fotovoltaickým panelem.
4. Proveďte ověření funkčnosti zařízení pomocí měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

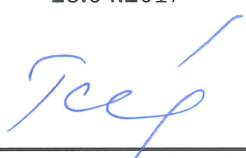
Dle pokynů vedoucího závěrečné práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Sobek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. 4. 2017

.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Sobkovi, Ph. D. za odborné vedení práce, konzultace a cenné rady při zpracování této práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je realizace vícezdrojového záložního napájecího systému s fotovoltaickým panelem, který je řízený mikrokontrolérem. V první části práce je proveden základní rozbor jednotlivých prvků systému, který se skládá z fotovoltaického panelu, stejnosměrného měniče a akumulátoru. Dále jsou zpracovány metody nabíjení akumulátorů a také možnosti ukončení jejich nabíjení. Následují metody hledání maximálního bodu výkonu panelu (MPPT). Druhá část práce se zabývá samotným návrhem a realizací zařízení. Obsahuje výpočty, dimenzování součástek a simulace. V poslední části práce je provedeno ověření funkčnosti systému měřením a porovnání naměřených hodnot se simulacemi.

Klíčová slova

fotovoltaický panel, DC/DC měnič, akumulátor, MPPT metody, metody nabíjení akumulátorů

Abstract

The goal of this thesis is realization of backup multi-source power system with photovoltaic panel controlled by microcontroller. First part of the thesis is focused on basic analysis of individual parts of the system which consists of a photovoltaic panel, DC/DC converter and battery. There are battery charging methods and charging termination options described further on. Following are methods of finding maximal point of performance (MPPT). Second part of the thesis is focused on design itself and realization. It contains calculations, components dimensioning and simulations. In the final part of the thesis, there is system functionality check by measurement and comparison of measured results with simulations.

Key words

photovoltaic panel, DC/DC converter, battery, MPPT methods, methods of charging the battery

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	9
Seznam použitých symbolů a indexů.....	10
Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
1 Úvod.....	14
2 Konstrukční prvky systému.....	15
2.1 Fotovoltaické panely	15
2.1.1 Princip fotovoltaických panelů.....	15
2.1.2 Konstrukce fotovoltaických panelů.....	16
2.1.3 Rozdělení fotovoltaických panelů	16
2.1.4 Parametry fotovoltaických panelů.....	18
2.2 DC/DC měniče	21
2.2.1 Snižující měnič – step down (buck)	21
2.2.2 Zvyšující měnič – step up (boost)	22
2.2.3 Invertující měnič	23
2.3 Akumulátory.....	24
2.3.1 Obecný popis.....	24
2.3.2 Rozdělení akumulátorů	24
2.3.3 Parametry akumulátorů	25
3 Možnosti nabíjení akumulátorů.....	27
3.1 Nejpoužívanější typy akumulátorů.....	27
3.1.1 Olověný akumulátor (Pb)	27
3.1.2 Niklo – kadmiový akumulátor (NiCd)	27
3.1.3 Nikl – metal hydridový akumulátor (NiMH)	27
3.1.4 Lithium – iontový akumulátor (Li-Ion).....	27
3.1.5 Lithium – polymerový akumulátor (Li-Pol).....	28
3.1.6 Lithium – železo – fosfátový akumulátor (LiFePO ₄).....	28
3.2 Metody nabíjení akumulátorů	28
3.2.1 Proudové nabíjení.....	28
3.2.2 Napětíové nabíjení	29
3.3 Metody pro ukončování nabíjení.....	30

3.3.1	Časové ukončení	30
3.3.2	Napěťové ukončení	30
3.3.3	Proudové ukončení.....	32
3.3.4	Teplotní ukončení.....	33
4	Sledování maximálního bodu výkonu panelu a metody MPPT	34
4.1	Metody MPPT	34
4.1.1	Fractional open – circuit voltage V_{OC}	34
4.1.2	Fractional short – circuit current I_{SC}	35
4.1.3	Perturb and observe (P&O).....	35
4.1.4	Přehled dalších MPPT metod.....	36
5	Návrh a realizace záložního vícezdrojového systému.....	37
5.1	Návrh a realizace snižujícího měniče.....	40
5.1.1	Návrh a dimenzování součástek.....	40
5.1.2	Výpočet indukčnosti tlumivky	40
5.1.3	Návrh a výpočet chladiče	41
5.1.4	Měření vstupního a výstupního napětí	43
5.1.5	Měření vstupního a výstupního proudu.....	44
5.1.6	Návrh budícího obvodu tranzistoru.....	45
5.2	Návrh a simulace 5 V zdrojů.....	46
5.2.1	Návrh 5 V zdrojů.....	46
5.2.2	Simulace zdroje v OrCAD PSpice	47
5.3	Návrh a realizace balančního obvodu	47
5.4	Schémata zapojení a plošné spoje	48
5.5	Realizace softwaru pro mikrokontrolér.....	48
6	Měření	49
7	Závěr	52
	Seznam použité literatury a zdrojů.....	53
	Seznam příloh	55

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam zkratky
<i>A/D</i>	analogově / digitální
<i>CCCV</i>	metoda konstantního proudu následovaná konstantním napětím (Constant Current followed by Constant Voltage)
<i>DC</i>	stejnoseměrný proud (Direct current)
<i>DPS</i>	deska plošných spojů
<i>EVA</i>	etylvinylacetát
<i>FF</i>	faktor plnění (Fill Factor)
<i>FV</i>	fotovoltaický
<i>IGBT</i>	tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
<i>LiFePO₄</i>	typ akumulátoru – Lithium železo fosfátový
<i>Li-Ion</i>	typ akumulátoru – Lithium iontový
<i>Li-MnO</i>	typ akumulátoru – Lithium manganový
<i>Li-Pol</i>	typ akumulátoru – Lithium polymerový
<i>MOSFET</i>	polem řízený tranzistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
<i>MPP</i>	bod maximálního výkonu (Maximum Power Point)
<i>MPPT</i>	sledování maximálního bodu výkonu (Maximum Power Point Tracking)
<i>NiCd</i>	typ akumulátoru – Nikl-kadmiový
<i>NiMH</i>	typ akumulátoru – Nikl-metal hydridový
<i>PI</i>	proporcionálně integrační
<i>PVF-PET-PVF</i>	polyvinylidenfluorid-polyethyltereftalát-polyvinylidenfluorid
<i>PWM</i>	pulzní šířková modulace (Pulse Width Modulation)
<i>V-A</i>	voltampérová

Seznam použitých symbolů a indexů

Zkratka	Jednotka	Význam
A_C	[m ²]	plocha fotovoltaického článku
C	[-]	korekční faktor
C_I		kondenzátor
C_N	[F]	jmenovitá kapacita
C_r	[Ah]	kapacita akumulátoru deklarovaná výrobcem
d	[mm]	tloušťka
D_I		dioda
E	[lx]	intenzita osvětlení
f_s	[Hz]	spínací frekvence
I_{AKU}^*	[A]	žádaný proud akumulátoru
I_{AKU}	[A]	proud akumulátoru
I_L	[A]	indukovaný proud
I_m	[A]	maximální proud
I_{MaxAku}	[A]	maximální proud akumulátoru
I_{MPP}	[A]	proud, při kterém fotovoltaický panel dodává maximální výkon
I_{nab}	[A]	nabíjecí proud
I_{PAN}	[A]	proud panelu
I_{SC}	[A]	proud nakrátko (zkratový)
I_t	[A]	konzervační proud
I_{vyb}	[A]	vybíjecí proud
I_{zkr}	[A]	zkratový proud
L_I		cívka
P	[W]	výkon
P_{MPP}	[W]	maximální výkon v bodě MPP
P_{rad}	[W]	výkon dopadajícího záření
P_{TOT}	[W]	celkový ztrátový výkon
$R_{I, 2..}$	[Ω]	odpor
R_i	[Ω]	vnitřní odpor
$R_{i\,pan}$	[Ω]	vnitřní odpor panelu
R_m	[Ω]	vnitřní odpor článku
R_{SH}	[Ω]	paralelní odpor
R_{SO}	[Ω]	sériový odpor
$R_{TH\,C-A}$	[°C/W]	tepelný odpor pouzdro – okolí
$R_{TH\,C-H}$	[°C/W]	tepelný odpor pouzdro – chladič
$R_{TH\,H-A}$	[°C/W]	tepelný odpor chladič – okolí
$R_{TH\,J-C}$	[°C/W]	tepelný odpor přechod – pouzdro
R_z		obecná zátěž
S	[cm ²]	plocha
t	[s]	čas
T	[s]	perioda

T_I		tranzistor
$T_{I,2}$	[s]	doba vedení součástky
T_A	[°C]	teplota okolí
T_C	[°C]	teplota pouzdra
T_H	[°C]	teplota chladiče
T_J	[°C]	teplota přechodu
U_{AKU}^*	[V]	žádané napětí akumulátoru
U_0	[V]	napětí naprázdno
U_{AKU}	[V]	napětí akumulátoru
U_{IN}	[V]	vstupní napětí
U_m	[V]	maximální napětí
U_{MPP}	[V]	napětí, při kterém fotovoltaický panel dodává maximální výkon
U_N	[V]	jmenovité napětí
U_{OC}	[V]	napětí naprázdno
U_{OUT}	[V]	výstupní napětí
U_{PAN}	[V]	napětí panelu
η	[%]	účinnost
λ	[-]	tepelná vodivost

Seznam obrázků

Obr. 2.1 - Blokové schéma zapojení vícezdrojového záložního systému s fotovoltaickým panelem...	15
Obr. 2.2 - Základní princip fotovoltaického jevu (převzato z [3])	15
Obr. 2.3 - Struktura fotovoltaického panelu (převzato z [5])	16
Obr. 2.4 - Monokrystalický článek (převzato z [1]).....	17
Obr. 2.5 - Polykrystalický článek (převzato z [1])	17
Obr. 2.6 - Amorfni článek (převzato z [6])	18
Obr. 2.7 - Voltampérová charakteristika FV panelu pro různé intenzity slunečního záření	18
Obr. 2.8 - Schéma zapojení snižujícího měniče	21
Obr. 2.9 - Snižující měnič – průběhy pro spojitý a nespojitý proud	22
Obr. 2.10 - Schéma zapojení zvyšujícího měniče	22
Obr. 2.11 - Zvyšující měnič – průběhy pro spojitý a nespojitý proud.....	23
Obr. 2.12 - Schéma zapojení invertujícího měniče	23
Obr. 2.13 - Blokové schéma funkce akumulátoru.....	24
Obr. 3.1 - Napěťové nabíjení metodou CCCV	30
Obr. 3.2 - Metoda časového ukončení.....	30
Obr. 3.3 - Metoda napěťového ukončení V_{co}	31
Obr. 3.4 - Metoda napěťového ukončení PKV	31
Obr. 3.5 - Metoda napěťového ukončení $-\Delta V$	32
Obr. 3.6 - Metoda napěťového ukončení d^2V/dt	32
Obr. 3.7 - Metoda proudového ukončení	32
Obr. 3.8 - Metoda teplotního ukončení TCO	33
Obr. 3.9 - Metoda teplotního ukončení $\Delta T/\Delta t$	33
Obr. 4.1 - Voltampérová charakteristika fotovoltaického panelu	34
Obr. 5.1 - Blokové schéma návrhu záložního vícezdrojového systému.....	37
Obr. 5.2 - Schéma zapojení snižujícího měniče	37
Obr. 5.3 - Fotovoltaický panel RS-M50.....	38
Obr. 5.4 - Voltampérová charakteristika panelu RS-M50.....	38
Obr. 5.5 - Akumulátor $LiFePO_4$ (4 články).....	39
Obr. 5.6 - Mikrokontrolér FRDM-KL25Z	39
Obr. 5.7 - Náhradní schéma tepelných přechodů	42
Obr. 5.8 - Schéma vstupního měření napětí (panelu).....	44
Obr. 5.9 - Schéma výstupního měření napětí (akumulátoru)	44
Obr. 5.10 - Závislost výstupního napětí na měřeném proudu proudového senzoru (převzato z [22]) ..	44
Obr. 5.11 - Schéma měření vstupního proudu.....	45
Obr. 5.12 - Schéma měření výstupního proudu.....	45
Obr. 5.13 - Schéma budícího obvodu.....	46
Obr. 5.14 - Schéma zapojení 5 V zdroje	46
Obr. 5.15 - Model 5 V zdroje v prostředí OrCAD PSpice	47
Obr. 5.16 - Průběh simulace.....	47
Obr. 5.17 - Schéma zapojení balančního obvodu pro jeden článek	48
Obr. 5.18 - Regulační blokové schéma	48
Obr. 6.1 - Schéma zapojení pro ověření funkčnosti zařízení	49

Obr. 6.2 - Grafické porovnání měřeného a simulovaného maximálního bodu výkonu	49
Obr. 6.3 - Graf účinnosti snižujícího měniče	50
Obr. 6.4 - Schéma zapojení pro měření účinnosti 5 V zdroje	50
Obr. 6.5 - Graf změřené účinnosti 5 V zdroje pro různá vstupní napětí	51

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 - Popis algoritmu metody P&O	35
Tabulka 4.2 - Přehled MPPT metod (převzato z [14])	36
Tabulka 5.1 - Parametry fotovoltaického panelu RS-M50 [16]	38
Tabulka 5.2 - Parametry LiFePO4 článku	39
Tabulka 5.3 - Parametry tranzistoru a diody z katalogového listu [19] [20]	42

1 Úvod

Elektrickou energii potřebujeme v dnešní moderní době všichni a ideálně všude na světě. Proto se v místech, kde ji nelze přivést využívá fotovoltaických panelů, které slouží k výrobě energie ze slunečního záření. Získanou energii je možné uchovávat v akumulátorech a následně ji z nich odebírat. K nabíjení i odebírání energie slouží stejnosměrné měniče. Měniče spolu s akumulátorem a fotovoltaickým panelem tvoří vícezdrojový záložní napájecí systém, který je dále popsán.

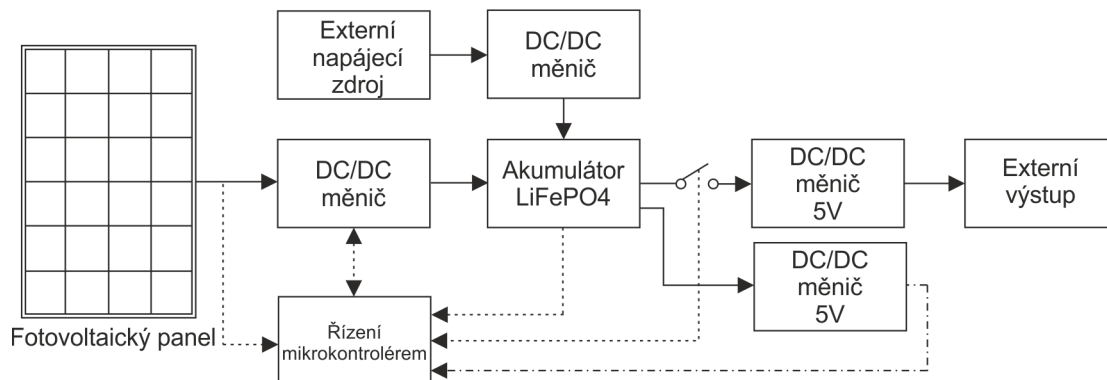
Hlavním cílem práce je vytvoření vícezdrojového záložního systému s fotovoltaickým panelem, který je řízený mikrokontrolérem. Na základě návrhu a výběru vhodných součástek celý systém sestrojít a poté měřením ověřit jeho funkčnost.

Práce je členěna do 7 hlavních kapitol. V první kapitole je uvedený její stručný přehled. Druhá kapitola se zabývá základní charakteristikou a členěním konstrukčních prvků systému. Následující část popisuje nejčastěji používané typy akumulátorů a jejich metody nabíjení. Další kapitola je věnována metodám hledání maximálního výkonu panelu. Obsahem páté části je návrh a realizace celého zařízení. Předposlední kapitola zachycuje výsledky simulace a měření, které slouží k ověření funkčnosti sestrojeného systému. V závěru práce je uvedeno její shrnutí.

2 Konstrukční prvky systému

Vícezdrojový záložní systém s fotovoltaickým panelem je složen z těchto základních konstrukčních prvků:

- fotovoltaický článek,
- DC/DC měnič,
- akumulátor,
- řídicí jednotka s mikrokontrolérem.

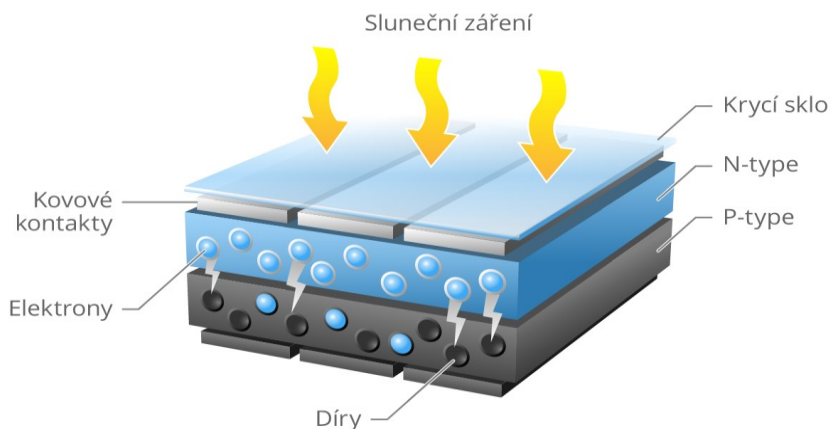


Obr. 2.1 - Blokové schéma zapojení vícezdrojového záložního systému s fotovoltaickým panelem

2.1 Fotovoltaické panely

2.1.1 Princip fotovoltaických panelů

K přeměně sluneční energie na energii elektrickou se využívají fotovoltaické články (panely), které je možné popsat jako polovodičové diody s velkou plochou P-N přechodu. Fotovoltaické články fungují na principu fotovoltaického jevu. Tento jev byl objeven Alexandrem Edmundem Becquerelem, kterému se podařilo zjistit, že dopadající sluneční záření na polovodič, způsobuje pohlcování světelných částic (fotonů) a uvolňování elektronů. V polovodiči vzniká volný elektrický náboj, pár elektron – díra, a ten je možné z polovodiče odvádět jako elektrickou energii (viz obr. 2.2). [1], [2]



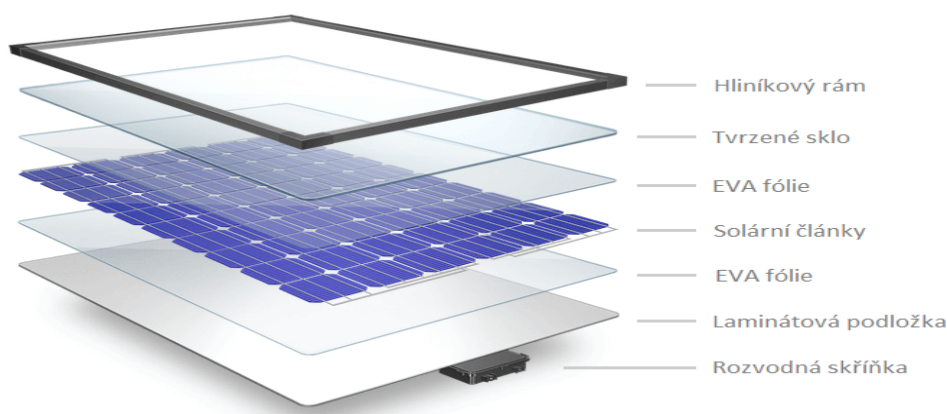
Obr. 2.2 - Základní princip fotovoltaického jevu (převzato z [3])

2.1.2 Konstrukce fotovoltaických panelů

Fotovoltaické články jsou velmi citlivá, křehká a náchylná zařízení, která jsou zapouzdřena do fotovoltaických panelů nebo modulů, aby se zajistila jejich správná funkce po dobu několika let. Fotovoltaické panely (moduly) chrání články před povětrnostními vlivy, mechanickým poškozením, oxidací, korozí, znečištěním, kroupy apod.

Horní strana panelu je pokryta tvrzeným sklem, které má vynikající propustnost světelného záření a zároveň odolá i krupobití. Druhou vrstvou je EVA (etylvinylacetát) fólie, na které se ukládají jednotlivé fotovoltaické články. Články mohou být propojeny sériově nebo paralelně, ale často se využívá kombinace obou dvou typů zapojení. Ze spodní strany článku se znovu nanáší EVA fólie. Spodní strana panelu je tvořena z laminátové kompozice PVF-PET-PVF (polyvinylidenfluorid-polyetyléntereftalát-polyvinylidenfluorid). Struktura konstrukce fotovoltaického panelu je zobrazena na obr. 2.3.

Vzduch mezi jednotlivými vrstvami je odsán. Celý panel se zahřeje na teplotu tání EVA fólie, která se roztaví a vyplní prostor kolem článků mezi horním tvrzeným sklem a spodní laminátovou podkladovou deskou. Panel se následně orámuje hliníkovým rámem, utěsní se silikonovým tmelem a doplní se o rozvodnou skříňku opatřenou výstupními (propojovacími) konektory. Takto vyrobené fotovoltaické panely na bázi krystalických polovodičů jsou prachotěsné i vodotěsné a jejich životnost je okolo 20 až 30 let. [4]



Obr. 2.3 - Struktura fotovoltaického panelu (převzato z [5])

2.1.3 Rozdělení fotovoltaických panelů

Fotovoltaické články lze rozdělit z hlediska dlouhodobého vývoje následovně:

- první generace – monokrystalické články,
- druhá generace – polykrystalické články,
- třetí generace – amorfnní články.

2.1.3.1 První generace – monokrystalické články

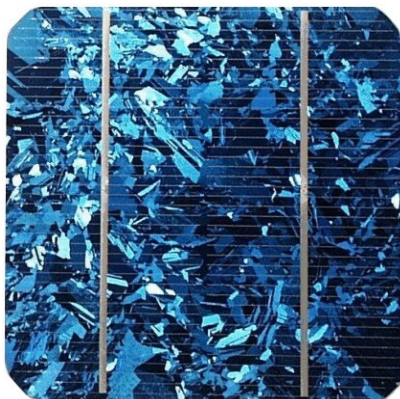
Tyto články se skládají z jediného krystalu a využívají křemíkové desky (viz obr. 2.4). Vyrábí se od 70. let a v dnešní době mají největší podíl na trhu ve výrobě. Jsou charakteristické dlouhou životností při zachování účinnosti, která se pohybuje v rozmezí 13 až 17 %. Nevýhoda monokrystalických článků je, že se při jejich výrobě používá velké množství drahého čistého křemíku. [1]



Obr. 2.4 - Monokrystalický článek (převzato z [1])

2.1.3.2 Druhá generace – polykrystalické články

Základem těchto panelů je křemíková deska. Články se skládají z většího počtu menších a různě orientovaných krystalů (viz obr. 2.5). Absorbující vrstva je několiksetkrát tenčí, čímž dochází k úspoře materiálu. Tím ovšem současně dochází ke snížení účinnosti polykrystalických článků, která klesla na hodnoty 12 až 14 %. [4]

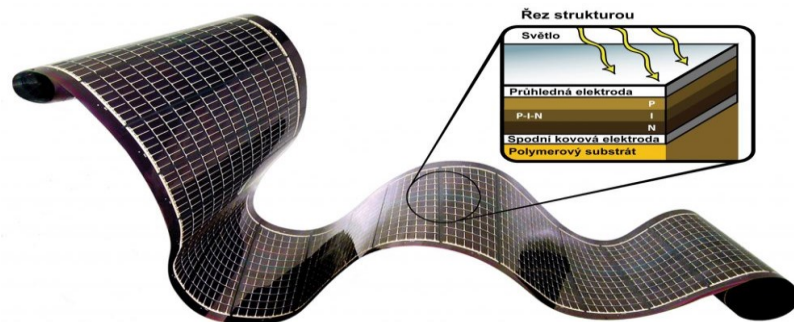


Obr. 2.5 - Polykrystalický článek (převzato z [1])

Díky tenkému profilu článků dochází k úspoře hmotnosti a zlepšení mechanických vlastností, především pružnosti. Jejich výroba je v porovnání s monokrystalickými panely mnohem jednodušší, rychlejší a není potřeba takové množství drahého čistého křemíku. Je tedy i levnější, ale oproti monokrystalickým článkům je potřeba pro zachování stejného výkonu větších rozměrů panelů.

2.1.3.3 Třetí generace – amorfni články

Základem amorfních panelů je napařovaná křemíková vrstva, která je tvořena tenkovrstvými články amorfního křemíku (a-Si), amorfních slitin Si-Ge (a-Si-Ge), mikrokrytalického křemíku ($\mu\text{c-Si}$) nebo také polykrystalického tenkovrstvého křemíku (poly-Si). Napařovaná křemíková vrstva je nanášena v tenké vrstvě na fólii nebo sklo. Účinnost těchto fotovoltaických článků je opět nižší, pohybuje se od 7 do 9 %. Pro dosažení daného výkonu je tedy potřeba až 2,5x větší plochy, než kolik by bylo potřeba při použití monokrystalických nebo polykrystalických panelů. Tyto typy článků patří dnes na trhu k těm nejlevnějším (viz obr. 2.6). [4]

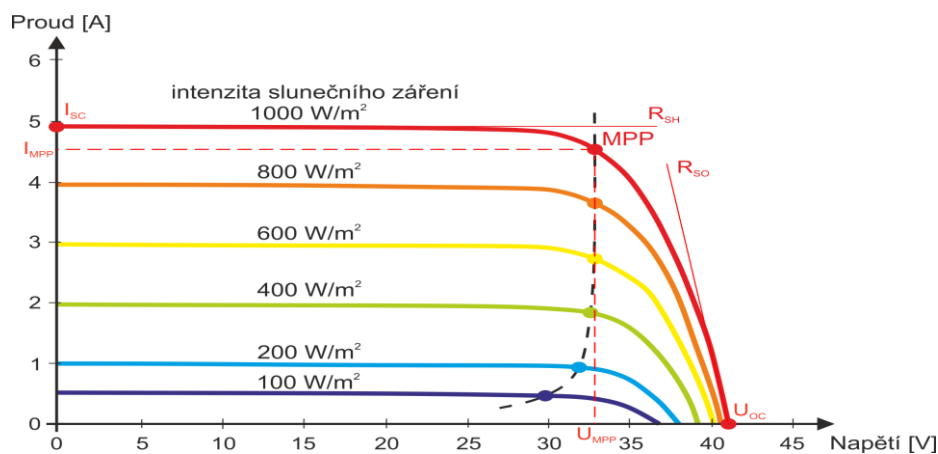


Obr. 2.6 - Amorfni článěk (převzato z [6])

Fotovoltaické panely na bázi amorfního a-Si jsou ohebné, pružné a také podstatně tenčí a lehčí než panely krystalické. Při výrobě je lze přímo aplikovat na horní povrch upraveného pružného ocelového substrátu a běžných polymerních hydroizolačních fólií – EVA fólie (fólie na bázi etylen-vinyl-acetátu). Články tak nepotřebují žádnou vlastní oporu nebo nosnou konstrukci jako krystalické články. [6]

2.1.4 Parametry fotovoltaických panelů

K určení základních parametrů fotovoltaického panelu využíváme voltampérovou charakteristiku (viz obr. 2.7), která popisuje grafickou závislost proudu na napětí. Následující podkapitoly vycházejí z literatury [7].



Obr. 2.7 - Voltampérová charakteristika FV panelu pro různé intenzity slunečního záření

2.1.4.1 Zkratový proud

Zkratový proud neboli proud nakrátko I_{SC} je maximální proud při daném osvětlení a při nulovém napětí. Při předpokladu nulového odporu R_{SO} je zkratový proud roven proudu generovanému $I_{SC} = I_L$. Zkratový proud se pohybuje v jednotkách až desítkách ampér a je závislý na intenzitě osvětlení, spektrální citlivosti, teplotě a ozářené ploše panelů.

2.1.4.2 Napětí naprázdno

Napětí naprázdno U_{OC} je maximální napětí na výstupních svorkách fotovoltaického panelu bez připojené zátěže, tedy při nulovém proudu. Toto napětí se pohybuje v desítkách až stovkách voltů, v závislosti pro danou teplotu a intenzitu osvětlení fotovoltaického panelu.

2.1.4.3 Pracovní bod

Pracovní bod je bod na voltampérové charakteristice, ve kterém fotovoltaický panel zrovna pracuje. Poloha pracovního bodu se pohybuje v závislosti na vlastnostech spotřebiče a na velikosti teploty panelu. Poloha pracovního bodu by měla být shodná s polohou bodu maximálního výkonu. Když pracovní bod bude ležet v bodě napětí naprázdno nebo v bodě zkratového proudu, nebude panel generovat žádný výkon.

2.1.4.4 Bod maximálního výkonu

Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point) je bod, který udává hodnotu maximálního výkonu na voltampérové charakteristice prostřednictvím proudové a napěťové souřadnice, jimiž jsou:

- U_{MPP} – napětí, při kterém fotovoltaický panel dodává maximální výkon,
- I_{MPP} – proud, při kterém fotovoltaický panel dodává maximální výkon,
- P_{MPP} – maximální výkon, který se nachází v bodě MPP, uprostřed ohybu voltampérové charakteristiky.

2.1.4.5 Maximální výkon

Maximální výkon P_{MPP} je výkon, který je schopen panel dodávat. Výkon P_{MPP} se nachází v bodě MPP, který je v ohybu voltampérové charakteristiky a je dán vztahem:

$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP}, \quad (2.1)$$

kde U_{MPP} je napětí v bodě maximálního výkonu panelu a I_{MPP} je proud v bodě maximálního výkonu panelu. Sledovač maximálního výkonu panelu se snaží upravovat parametry zátěže tak, aby fotovoltaický článek mohl neustále dodávat co nejvyšší výkon.

2.1.4.6 Faktor plnění

Faktor plnění FF (Fill Factor) je poměr mezi maximálním výkonem P_{MPP} a výkonem, který vytvoří zkratový proud I_{SC} a napětí naprázdno U_{OC} . Fill Factor je závislý na morfologii materiálů, kvalitě kontaktů a na odporu aktivní polovodičové vrstvy. Čím je hodnota faktoru plnění vyšší, tím větší výkon je schopen panel dodat do zátěže. Hodnota Fill Factoru pro monokrystalické a polykrystalické panely se pohybuje okolo 70 až 85 % a pro amorfní panely bývá kolem 60 %. Faktor plnění se dá vyjádřit vztahem:

$$FF = \frac{P_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}}. \quad (2.2)$$

2.1.4.7 Účinnost

Účinnost panelu je dána vlastnostmi materiálů, ze kterých je fotovoltaický článek a panel vyroben. Materiál totiž ovlivňuje spektrální citlivost článku, což znamená, že článek panelu využívá energii z dopadajícího záření v různých vlnových délkách s různou účinností. Účinnost článku fotovoltaického panelu lze vyjádřit vztahem:

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{rad}} = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A_c}, \quad (2.3)$$

kde P_{rad} je výkon dopadajícího záření, E je intenzita osvětlení při standardizovaných zkušebních podmínkách a A_c plocha fotovoltaického článku.

2.1.4.8 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor článku R_m je jedním z důležitých parametrů, protože na odporu dochází k nežádoucímu úbytku napětí. Vnitřní odpor článku je dán poměrem maximálního napětí U_m ku maximálnímu proudu I_m a lze jej vyjádřit vztahem:

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}. \quad (2.4)$$

2.1.4.9 Sériový a paralelní odpor

Velikosti sériového odporu R_{SO} a paralelního odporu R_{SH} nám udávají informaci o kvalitě fotovoltaického článku. Ve voltampérové charakteristice odpovídají parametry sériového a paralelního odporu tečnám v bodech I_{SC} a U_{OC} . Sériový parazitní odpor závisí na celkovém odporu polovodičového materiálu, vrstev, odporu kontaktů a propojení. Čím vyšší bude hodnota sériového odporu, tím vyšší bude úbytek napětí na svorkách panelu. Paralelní parazitní odpor může být způsobený rozsáhlými defekty krystalické mřížky nebo svodovým proudem kolem okrajů článku. Nízký paralelní odpor značí vadný článek, který se chová jako by byl uvnitř zkratován.

2.2 DC/DC měniče

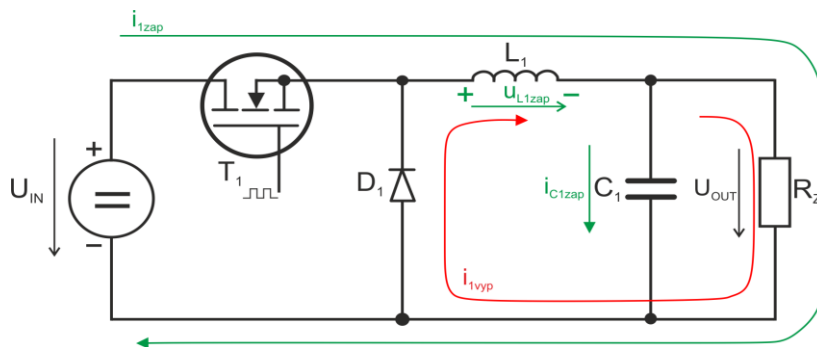
DC/DC měnič neboli stejnosměrný měnič je pojem, kterým obvykle označujeme elektronický měnič, který se využívá ke změně velikosti stejnosměrného napětí nebo proudu. Využívá se pro převod mezi různými stejnosměrnými napájecími soustavami. Pro spínání se nejčastěji používají tranzistory (MOSFET nebo IGBT) a diody, pro dočasné uchování naakumulované energie se využívají cívky a kondenzátory, a pro galvanické oddělení se využívají transformátory. [8]

Typy DC/DC měničů bez galvanického oddělení:

- snižující měnič – step down,
- zvyšující měnič – step up,
- invertující měnič.

2.2.1 Snižující měnič – step down (buck)

Základní měnič sloužící ke změně vyššího vstupního napětí na nižší výstupní napětí. Výstupní napětí U_{OUT} se dá regulovat střídou spínání v rozsahu od 0 do 100 %.



Obr. 2.8 - Schéma zapojení snižujícího měniče

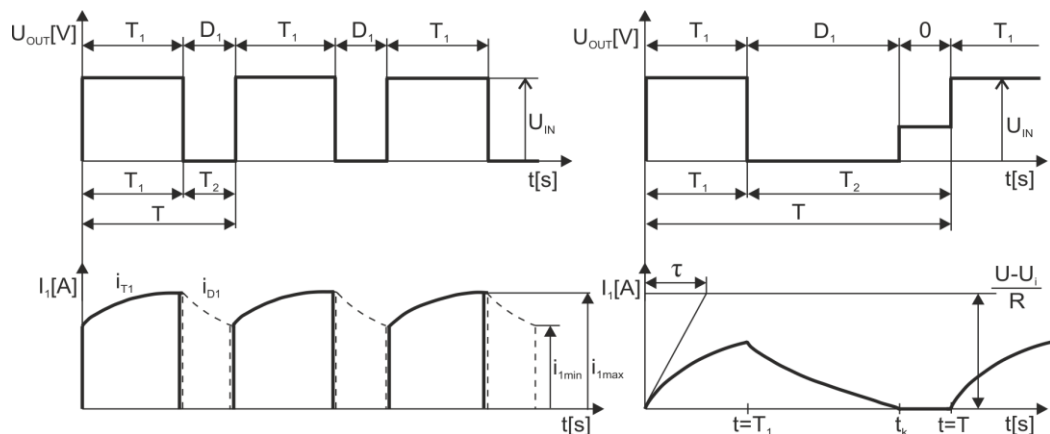
V době sepnutí spínacího prvku - tranzistoru T_1 ze zdroje U_{IN} teče proud I_L cívkou L_1 do zátěže R_Z . Cívka L_1 se chová jako spotřebič. Napětí na ní má stejnou polaritu jako protékající proud, který zároveň nabíjí kondenzátor C_1 .

Rozepnutím spínacího tranzistoru T_1 se polarita napětí na cívce L_1 obrátí, proud zachová svůj směr a z cívky se stává zdroj. Obvod se uzavírá přes diodu D_1 a kondenzátor C_1 se vybíjí do zátěže R_Z , čímž proud I_{C1vyp} posílí proud I_{L1vyp} tekoucí do zátěže.

Na obr. 2.9 jsou zobrazeny průběhy pro obecné zapojení pracující se spojitým i nespojitým proudem. Zanedbají-li se úbytky napětí na spínacím tranzistoru T_1 , cívce C_1 a na diodě D_1 , může se výstupní napětí vyjádřit vztahem [9]:

$$\text{pro spojitý proud:} \quad U_{OUT} = \frac{T_1}{T} \cdot U_{IN}, \quad (2.5)$$

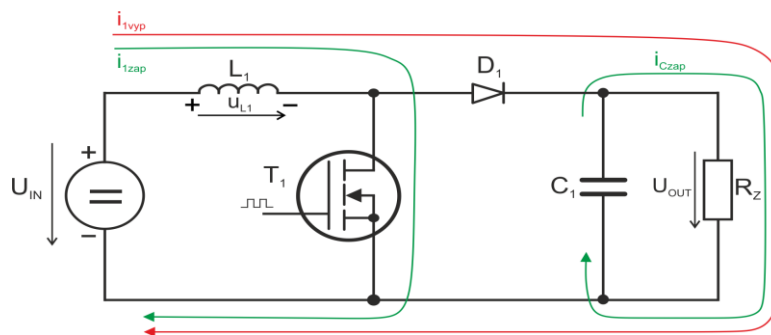
$$\text{pro nespojitý proud:} \quad U_{OUT} = \frac{1}{T} \cdot [U_{IN} \cdot T_1 + U_L \cdot (T - t_k)]. \quad (2.6)$$



Obr. 2.9 - Snižující měnič – průběhy pro spojitý a nespojitý proud

2.2.2 Zvyšující měnič – step up (boost)

Zvyšující měnič napětí řadíme mezi nepřímý měnič z důvodu akumulace energie v magnetickém poli cívky L_1 . Tento typ měniče mění nižší vstupní napětí U_{IN} na vyšší výstupní napětí U_{OUT} .



Obr. 2.10 - Schéma zapojení zvyšujícího měniče

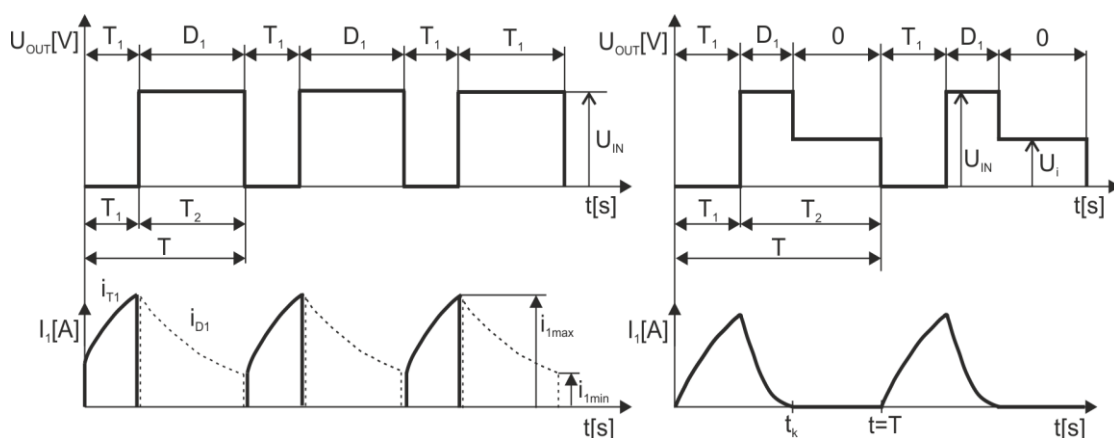
Při sepnutí spínacího prvku T_1 začne lineárně růst zapínací proud I_L (za předpokladu neměnného vstupního napětí U_{IN}), který poteče do cívky L_1 a přes spínač T_1 se uzavře. Cívka L_1 se bude chovat jako spotřebič a začne se na ní akumulovat energie. Kondenzátor C_1 dodává proud do zátěže. Dioda D_1 zabraňuje vybíjení kondenzátoru přes spínací prvek T_1 ve chvíli, kdy je tranzistor T_1 sepnut.

Rozepnutím spínacího tranzistoru T_1 poteče proud ze zdroje U_{IN} a z cívky L_1 (nyní se chová jako zdroj) do zátěže a do výstupního kondenzátoru C_1 . Napětí na výstupu U_{OUT} je dáno součtem dílčích zdrojů, kterými jsou v tuto chvíli vstupní zdroj U_{IN} a cívka L_1 .

Na obr. 2.11 jsou zobrazeny průběhy pro obecné zapojení pracující se spojitým i nespojitým proudem. Zanedbají-li se úbytky napětí na spínacím tranzistoru T_1 , cívce C_1 a na diodě D_1 , může se výstupní napětí vyjádřit vztahem [9]:

$$\text{pro spojitý proud: } U_{OUT} = \frac{T_2}{T} \cdot U_{IN} = \frac{T-T_1}{T} \cdot U_{IN}, \quad (2.7)$$

$$\text{pro nespojitý proud: } U_{OUT} = \frac{1}{T} \cdot [U_{IN} \cdot (t_k \cdot T_1) + U_L \cdot (T - t_k)]. \quad (2.8)$$



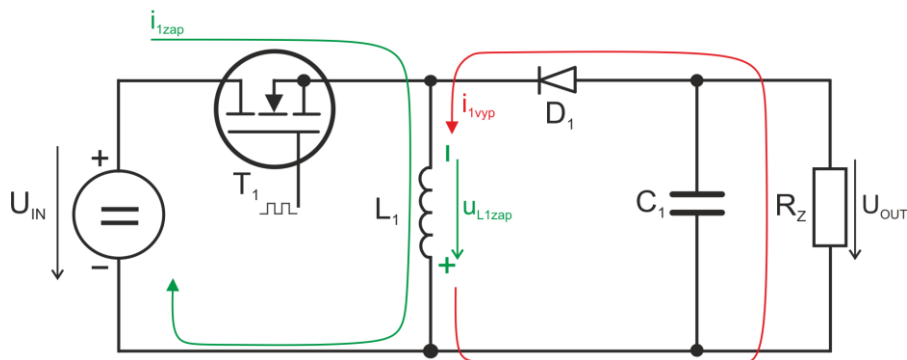
Obr. 2.11 - Zvyšující měnič – průběhy pro spojitý a nespojitý proud

2.2.3 Invertující měnič

Tento typ měniče převrací polaritu výstupního napětí U_{OUT} oproti vstupnímu U_{IN} .

V době sepnutí tranzistoru T_1 , je dioda polarizována v závěrném směru, proud I_{Lzap} začne protékat obvodem jen přes cívku L_1 , na které se začne shromažďovat energie (cívka se chová jako spotřebič). Proud do zátěže je dodáván z kondenzátoru a zároveň klesá výstupní napětí.

Při rozepnutí tranzistoru T_1 , se napětí na cívce L_1 obrátí (začne se chovat jako zdroj), dioda D_1 se otevře a proud $I_{L vyp}$ teče z cívky přes kondenzátor C_1 , na kterém vzniká záporné napětí. Na cívce proud lineárně klesá až do doby opětovného otevření tranzistoru T_1 .

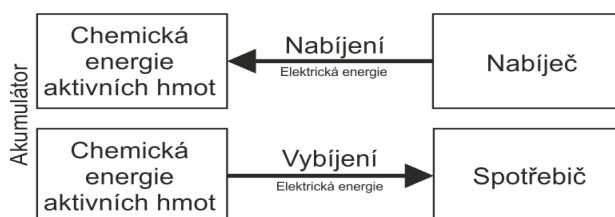


Obr. 2.12 - Schéma zapojení invertujícího měniče

2.3 Akumulátory

2.3.1 Obecný popis

Akumulátor je obecně chápán jako technické zařízení pro uchovávání elektrické energie, anebo taky jako elektrochemický zdroj elektrické energie, který je schopen dodávat stejnosměrný proud a lze jej dobít. Elektrické akumulátory (sekundární články) jsou chemické zdroje, které jsou schopny v průběhu nabíjení přijmout elektrickou energii z vnějšího zdroje a ukládat ji (akumulují ji) ve svých elektrodách jako energii chemickou (změnou chemického složení). Při vybíjení dodává akumulátor energii do spotřebiče, mění se chemické složení aktivních složek elektrod a chemická energie se mění na energii elektrickou. [10]



Obr. 2.13 - Blokové schéma funkce akumulátoru

Spojování jednotlivých článků akumulátoru má vliv na napětí a kapacitu baterie. Jsou-li články zapojené do série, má baterie oproti jednomu článku napětí tolikrát vyšší, kolik článků je do série zapojeno a kapacita zůstává nezměněna. Při zapojení článků paralelně se zvyšuje kapacita baterie tolikrát, kolik je článků zapojeno paralelně, napětí zůstává na úrovni jednoho článku.

2.3.2 Rozdělení akumulátorů

Elektrochemické zdroje proudu (akumulátory) se dají dělit podle různých hledisek, jako jsou konstrukce, chemické složení a použití. Následující podkapitoly vychází z literatury [11], [12].

2.3.2.1 Rozdělení akumulátorů podle použití

- Staniční baterie – trvale jsou dobíjeny a zajišťují nepřerušované napájení elektrickou energií v případě výpadku napětí z rozvodné sítě. Během své životnosti prodělají jen malý počet cyklů, proto se jejich životnost udává v rocích provozu.
- Trakční baterie – pracují v cyklickém provozu nabíjení – vybíjení, používané například pro pohon elektrických vozíků, plošin a automobilů. Jejich životnost se udává v počtu cyklu nabití – vybití.
- Startovací baterie – používají se jako zdroj elektrické energie ke spouštění spalovacích motorů. Jejich provoz je charakteristický tím, že jsou krátce (jednotky sekund) vybíjeny vysokými proudy, kdy se vybijí jen zlomek jejich kapacity, a pak po dobu provozu motoru jsou nabíjeny tak, aby byly udržovány v téměř nabitém stavu.
- Přístrojové baterie – převážně se používají jako jediný zdroj elektrické energie v různých mobilních zařízeních. Podle druhu zařízení se používají primární nebo akumulátorové baterie o kapacitách od setin do jednotek ampérhodin.

2.3.2.2 Rozdělení akumulátorů podle chemického složení

- Olovněné akumulátory (Pb)
 - S tekutým elektrolytem
 - S gelovým elektrolytem
- Niklové akumulátory (Ni)
 - Niklkadmiový (NiCd)
 - Metalhydridový (NiMH)
- Lithiové (Li)
 - Lithium iontový (Li-Ion)
 - Lithium polymerový (Li-Pol)
 - Lithium manganový (Li-MnO)
 - Lithium železo fosfátový (LiFePO₄)

2.3.2.3 Rozdělení akumulátorů podle stupně uzavření článkových nádob

- Otevřený článek – elektrolyt je v přímém kontaktu s ovzduším, není opatřen víkem, pro snížení úniku aerosolu do ovzduší se na články pokládá krycí sklo. Používají se u olovněných akumulátorů o kapacitách od desítek do několika tisíc ampérhodin.
- Uzavřený článek – má nádobu s víkem, která je opatřena otvorem pro únik plynů. Otvor je zajištěn zátkou nebo ventilem, přes který se může článek plnit elektrolytem, doplňovat vodu, popř. lze měřit teplotu a hustotu elektrolytu.
- Ventilem řízený článek – nádoba je uzavřená a je opatřena ventilem, který při dosažení dané hodnoty přetlaku v nádobě, uvolní přebytečný plyn z nádoby. Ventil nelze odejmout a do provozovaného článku se nedoplňuje elektrolyt ani voda.
- Uzavřený plynotěsný článek – je potřeba nabíjet proudem a napětím podle předpisu výrobce. Výše nabíjecích proudů a napětí jsou závislé na teplotě článků. Po celou dobu životnosti je článek trvale uzavřený, protože z něj neuniká žádný plyn ani elektrolyt (elektrolyt ani voda se nedoplňují). Bývá opatřen bezpečnostním systémem, který zabrání případnému vzrůstu nebezpečného vnitřního přetlaku při přebíjení článku.
- Hermetický článek – je plynotěsně uzavřený, bez zařízení k uvolňování přetlaku. Úplná hermetizace je možná jen u článků, ve kterých se neuvolňují žádné plyny (např. primární články a akumulátory s jinými než vodnými elektrolyty). Za plně hermetizované lze považovat též články, u kterých je difuzní koeficient vodíku větší než difuzní koeficienty jiných plynů.

2.3.3 Parametry akumulátorů

2.3.3.1 Jmenovitá kapacita C_N

Udává velikost elektrického náboje (množství energie) uložené v akumulátoru a výrobce ji zpravidla udává v ampérhodinách v praxi častěji v miliampérhodinách.

2.3.3.2 Jmenovité napětí akumulátorů U_N

Přibližná hodnota napětí použita k označení článku nebo baterie (obvykle zaokrouhlená hodnota středního vybíjecího napětí). Např. pro NiCd a NiMH je to 1,2 V (v provozu se toto napětí pohybuje od 0,8 – 1,5 V) a pro olovněné je to 2 V (v provozu se toto napětí pohybuje od 1,7 – 2,3 V).

2.3.3.3 Napětí naprázdno U_0

Jedná se o napětí nezapojeného zdroje (vždy má kladnou hodnotu). Je to rozdíl potenciálů mezi kladným a záporným pólovým vývodem zdroje, kterým neprochází proud.

2.3.3.4 Vybíjecí proud I_{vyb}

Proud udávaný v ampérech nebo miliampérech, který se uvádí s indexem označujícím vybíjecí dobu v hodinách. Např. I_{20} , I_{10} , I_5 , I_1 , $I_{0,5}$ A pro 20 h, 10 h, 5 h, 1 h, 0,5 h vybíjení, nebo v násobku ampérhodin kapacity: $I_{vyb} = 0,05 C_N$, $0,1 C_N$, $0,2 C_N$, $0,5 C_N$, $1 C_N$, $2 C_N$ A.

2.3.3.5 Nabíjecí proud I_{nab}

Uvádí se podobně jako vybíjecí proud, ale doba nabíjení se prodlužuje podle nabíjecího faktoru.

2.3.3.6 Konzervační proud I_t

Konzervační proud je nabíjecí proud, kterým se dlouhodobě udržuje akumulátor nabitý.

2.3.3.7 Nabíjecí faktor (nabíjecí ekvivalent)

Koeficient, kterým se násobí velikost náboje odebíraného při vybíjení akumulátoru, aby se dosáhlo úplného nabití akumulátoru. Např. pro olovněné akumulátory je to 1,15 a pro NiCd akumulátory 1,5.

2.3.3.8 Zkratový proud I_{zkr}

Zkratový proud je maximální proud dodaný zdrojem do vnějšího obvodu, jehož odpor má ve srovnání s odporem zdroje velmi malou hodnotu. Jinak definováno, jedná se o podíl jmenovitého napětí a elektrického odporu zdroje.

2.3.3.9 Vnitřní odpor R_i

Poměr změny napětí článku nebo baterie a odpovídající změny proudu za předepsaných podmínek. Je dán odporem elektrolytu mezi elektrodami článku.

2.3.3.10 Výkon článku P

Je součin vybíjecího napětí a vybíjecího proudu, udávaný ve wattech.

2.3.3.11 Samovybíjení

Ztráta kapacity zdroje způsobená spontánní reakcí uvnitř zdroje, který není připojen k vnějšímu elektrickému obvodu. Bývá způsobeno vedlejšími reakcemi, přímou interakcí reaktantů nebo vnitřním zkratem v článku. Udává se v procentech jmenovité kapacity. Bývá provázáno poklesem bezproudového napětí.

2.3.3.12 Životnost baterie

Doba užívání baterie za předepsaných podmínek. Vyjadřuje se zpravidla počtem cyklů nebo dobou, po kterou je baterie za daných provozních podmínek funkční.

2.3.3.13 Nabíjecí, vybíjecí charakteristika článku

Jde o grafické znázornění závislosti napětí na odebíraném nebo dodávaném náboji (nabíjecím nebo vybíjecím proudem).

3 Možnosti nabíjení akumulátorů

3.1 Nejpoužívanější typy akumulátorů

Níže vypsané akumulátory patří mezi nejpoužívanější typy akumulátoru. Následující podkapitoly vychází z literatury [10], [11], [13].

3.1.1 Olověný akumulátor (Pb)

Omezením Pb akumulátoru je, že při vybití (i částečném) trvajícím delší dobu dochází na jeho elektrodách k nevratným změnám, tzv. sulfataci. Sulfatace je děj, při kterém dochází k přeměně síranu olovnatého, který vznikl vybíjením na kladné elektrodě z oxidu olovičitého, který za krátkou dobu přechází do nerozpustné formy a dále už se nezúčastňuje nabíjecího procesu a tím se snižuje kapacita akumulátoru. Proto je potřeba akumulátor po použití brzy dobít. Životnost Pb akumulátoru je 5 – 15 let a vykazuje velice nízký samovybíjecí proud (2 – 3 % kapacity za měsíc). Nevýhodou tohoto akumulátoru je však nemožnost úplného vybíjení (maximálně 30 – 40 % kapacity).

3.1.2 Niklo – kadmiový akumulátor (NiCd)

Nikl-kadmiový akumulátor se vyrábí s kapalným elektrolytem a zaplavenými elektrodami a také jako hermetizovaný (pro použití v přístrojích, např. vrtačky apod.). Jeho výhodou je možnost skladování ve vybitém stavu, což zvyšuje odolnost vůči hlubokému vybití. Naopak nevýhodou oproti ostatním druhům akumulátorů je nízká měrná kapacita. Další nevýhodou je jedovatost kadmia, ze kterého je složena záporná elektroda. Elektrolyt je tvořen 20 – 22 % roztokem hydroxidu draselného (KOH) nebo hydroxidu solného (NaOH) a destilovanou vodou. Kladnou elektrodu akumulátoru tvoří oxid nikelnatý (NiO) s příměsemi, které zlepšují vodivost elektrolytu. Často používanou příměsí je grafit. Záporná elektroda je tvořena směsí kadmia, železa a oxidů železa. Jmenovité napětí článku je 1,2 V, při plném nabití pak 1,35 V. Vybitý článek má napětí 0,8 – 1 V.

3.1.3 Nikl – metal hydridový akumulátor (NiMH)

Nikl-metal hydridový akumulátor je kvůli poměrně velké kapacitě a schopnosti dodat velký proud jedním z nejpoužívanějších druhů akumulátorů. V porovnání s NiCd akumulátorem má zhruba dvojnásobnou kapacitu. Tento akumulátor však omezuje nízké napětí jednoho článku (1,2 V). Toto napětí je menší než u jednorázové baterie (1,5 V). Jednou z výhod tohoto akumulátoru je absence paměťového efektu, a naopak nevýhodou je horší výdrž při nízkých teplotách, tepelné ztráty při nabíjení a relativně vysoký samovybíjecí proud, jehož následkem dochází k vybíjení akumulátoru i bez připojené zátěže.

3.1.4 Lithium – iontový akumulátor (Li-Ion)

Lithium-iontový akumulátor se používá ve spotřební elektronice, především v mobilních telefonech a podobných zařízeních. Výborně se hodí kvůli své vysoké energetické hustotě. Výhodou tohoto akumulátoru je vysoká kapacita (až 3x větší než u NiMH akumulátoru), velice malý samovybíjecí cyklus (asi 5 % za rok) a tím i delší životnost. Nevýhodou je, že by se neměl nechat úplně vybit a také vzniká možnost výbuchu nebo vznícení při nabíjení. Napětí nabitého článku se pohybuje v rozmezí 3,6 – 3,7 V. Životnost článku se podle jeho typu pohybuje okolo 500 nabíjecích cyklů, pak kapacita klesá o 10 až 20 %. U tohoto článku se neprojevuje paměťový efekt, takže je možné dobíjení z jakékoliv úrovně vybití. Kladná elektroda je tvořena sloučeninami kovů např. LiCoO_2 , LiMnO_2 a záporná elektroda uhlíkem. Elektrolytem je organické rozpouštědlo a lithiová sůl LiPF_6 , LiBF_4 nebo LiClO_4 .

3.1.5 Lithium – polymerový akumulátor (Li-Pol)

Lithium-polymer akumulátor začíná být perspektivní pro použití v elektromobilech. Jeho omezením je nízký počet nabíjecích cyklů, a to okolo 500. Je použit pevný elektrolyt. Proto není potřeba masivní obal (elektrolyt nemůže vytéct) ani separátory (elektrolyt vymezuje mezery mezi elektrodami). Katoda je tvořena oxidem lithia a kobaltu eventuálně lithia, niklu a kobaltu, do jehož struktury jsou vpraveny ionty lithia. Anodu tvoří uhlík. Základní vlastnosti (napětí článku, způsoby nabíjení) jsou shodné s vlastnostmi Li-Ion akumulátoru.

3.1.6 Lithium – železo – fosfátový akumulátor (LiFePO₄)

Principiálně se jedná o lithium-iontový akumulátor, jehož anoda je tvořena sloučeninami lithia a katodu tvoří LiFePO₄. Pro zvýšení elektrické vodivosti (snížení vnitřního odporu) je do katody přidáno malé množství uhlíku. Akumulátor LiFePO₄ má mnoho stejných vlastností jako jiný Li-Ion akumulátor. Například při srovnání s LiCoO₂ akumulátorem je hlavní výhodou delší životnost, větší nabíjecí i vybíjecí proudy a vyšší bezpečnost vlivem větší odolnosti proti tepelnému přetížení. Fosfor a železo použité k výrobě katody nejsou tak drahé jako kobalt a zároveň jsou šetrnější k životnímu prostředí. Energetická hustota LiFePO₄ akumulátoru je nižší než u klasického akumulátoru Li-Ion, tato nevýhoda se ovšem zhruba po roce vytrácí. Důvodem je, že akumulátor LiFePO₄ ztrácí kapacitu pomaleji než Li-Ion a v dalších letech používání je díky tomu kapacita LiFePO₄ akumulátoru vyšší než u akumulátoru Li-Ion. Vyšší odolnost proti explozím je zajištěna vazbou Fe-P-O, která je pevnější než vazba Co-O. Při přehřátí a zkratu je těžší z vazby Fe-P-O odstranit kyslíkové atomy, a až při extrémní teplotě nad 800 °C dochází k havárii.

3.2 Metody nabíjení akumulátorů

Proces nabíjení akumulátorů může být proveden více způsoby, pro každý typ akumulátoru je vhodná jiná metoda. Nabíjení lze řídit v závislosti na velikosti nabíjecího proudu (proudové nabíjení) nebo na základě velikosti nabíjecího napětí (napěťové nabíjení). U baterií na bázi niklu (NiCd a NiMH) se využívá především proudem řízené nabíjení. U lithiových akumulátorů se využívá napěťové řízení nabíjení. Výkon a životnost akumulátoru je ovlivňována kvalitou nabíječky, zvolenou metodou nabíjení, a také dodržováním mezních hodnot pro nabíjení stanovené výrobcem. Mezními hodnotami se rozumí velikost nabíjecího proudu nebo napětí, doba nabíjení, rozsah povolené teploty.

Níže jsou uvedeny některé metody nabíjení baterií. [12]

3.2.1 Proudové nabíjení

Při této metodě nabíječka mění napětí tak, aby bylo dosaženo konstantního nabíjecího proudu. Pro jednotlivé typy nabíjení je výrobcem stanoven povolený rozsah nabíjecích teplot, který musí být bezpodmínečně dodržen. Rozsah povolené teploty je závislý na rychlosti nabíjení, čím rychleji se bude akumulátor nabíjet, tím užší bude povolený teplotní rozsah pro daný typ. U všech typů hermetických NiCd a NiMH akumulátorů je povoleno normální, konzervační a trvalé dobíjení. Ostatní způsoby nabíjení je možné použít pouze za podmínek stanovených výrobcem, a to jen u určených typů akumulátorů. Také pro každý typ akumulátoru jsou doporučeny výrobcem velikosti konzervační a trvalých proudů. Nabíjecí proud se udává jako referenční proud I_r :

$$I_t = \frac{C_r}{n}, \quad (3.1)$$

kde C_r je kapacita deklarována výrobcem a n je časová základna v hodinách, ve které je kapacita deklarována.

Dále jsou popsány jednotlivé způsoby proudového nabíjení z hlediska rychlosti. [12]

3.2.1.1 Normální nabíjení

Za normální nabíjení je považováno nabíjení akumulátorů po dobu 12 až 16 hodin proudem $0,1 I_r$. Tento způsob nabíjení je určen normou pro zkušební účely (např. pro stanovování jmenovité kapacity akumulátoru). Teplotní rozsah pro provozní nabíjení se většinou pohybuje od 0 do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, pro měření kapacity je definován normou a teplotní rozsah je užší, obvykle $20 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Normální nabíjení je vhodné používat pro akumulátory olovněné a NiCd, které jsou dlouhodobě skladovány.

3.2.1.2 Zrychlené nabíjení

U zrychleného nabíjení je stanovena doba nabíjení na 4 až 8 hodin. Při 4 až 5 hodinovém nabíjení se velikost nabíjecího proudu používá $0,3 I_r$ a povolený teplotní rozsah je od $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ většinou do $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro 7 až 8 hodinovém nabíjení se používá proud kolem $0,2 I_r$. Horní hranice teplotního rozsahu bývá povolena až na $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2.1.3 Rychlé nabíjení

Trvání rychlého nabíjení je stanoveno na dobu 1 až 2 hodiny, při nabíjecím proudu od $0,5$ až $1 I_r$. U tohoto typu nabíjení je povoleno dosahovat teplot od $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dolní teplotní hranice u některých NiMH akumulátorů může být $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo ve speciálních případech od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při rychlém způsobu nabíjení se nedoporučuje ukončení nabíjení hlídání časem, ale naopak se doporučuje napětíové nebo teplotní.

3.2.1.4 Velmi rychlé nabíjení

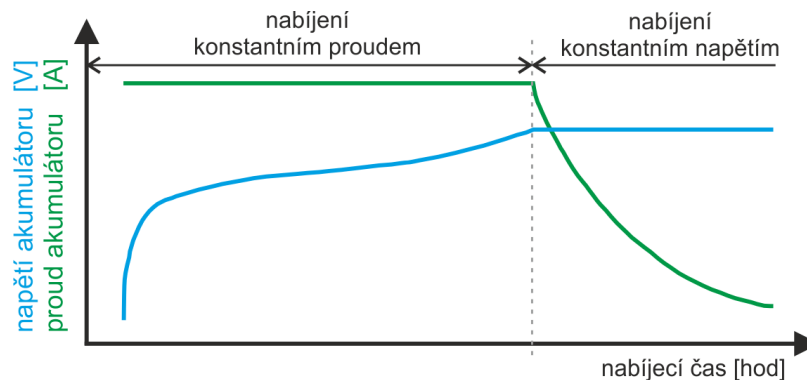
Velmi rychlé nabíjení je nabíjení v době trvání cca 15 minut až do jedné hodiny s nabíjecím proudem pohybujícím se v rozmezí 1 až $4 I_r$. Nejčastěji se tento způsob nabíjení používá u NiCd akumulátorů, které mají své uplatnění u profesionálního akumulátorového nářadí. Velmi rychlé nabíječky používají současně tři až čtyři způsoby vyhodnocení pro ukončení nabíjecího cyklu.

3.2.1.5 Trvalé dobíjení

Trvalé dobíjení je časově neomezené nabíjení akumulátoru malým proudem, který negativně ovlivňuje vlastnosti akumulátorového článku. Pro konkrétní typ článku je výrobcem stanoven nabíjecí proud v rozsahu $0,05$ až $0,06 I_r$. U akumulátorů, které jsou určeny přímo pro trvalé dobíjení odpovídá proud hodnotám až $0,1 I_r$, což je hodnota pro normální dobíjení.

3.2.2 Napětíové nabíjení

Tento typ nabíjení se používá pro nabíjení lithiových akumulátorů. Princip metody je obdobný jako u nabíjení Pb nebo NiCd akumulátorů. Jedná se o nabíjení konstantním proudem, dokud akumulátor nedosáhne předem stanoveného napětí. Poté pokračuje nabíjení konstantním napětím, čímž začne nabíjecí proud klesat. Často se tato metoda označuje jako „CCCV“ (Constant Current followed by Constant Voltage) nebo také nabíjení s charakteristikou „IU“. Když nabíjecí proud klesne na předem stanovenou hodnotu, tak se nabíjení ukončí. Teplotní rozsahy pro tuto metodu se pohybují od 0 do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



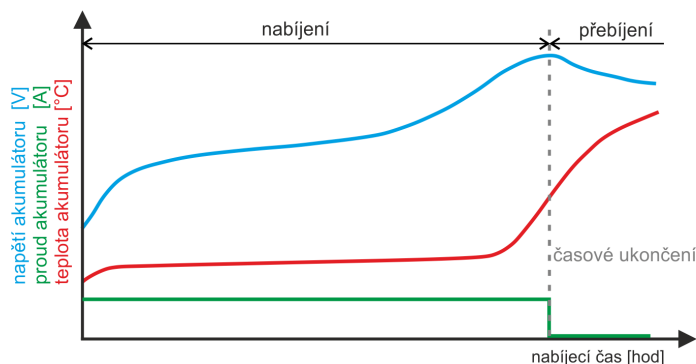
Obr. 3.1 - Napětové nabíjení metodou CCCV

3.3 Metody pro ukončování nabíjení

Správné ukončení nabíjení je velice důležité pro ochranu akumulátorů, především pokud nabíjíme-li akumulátor větším proudem. K tomu, aby nedocházelo ke snižování kapacity, životnosti či poškození akumulátoru vlivem přebíjení, jsou používány čtyři základní metody ukončení nabíjecího cyklu (vycházející z literatury [10], [12]).

3.3.1 Časové ukončení

Dříve nejčastěji používaná metoda, která se dnes používá jen u levnějších nabíječek. Princip metody spočívá v tom, že obvod s časovačem spustí časový interval (mezi 14 až 16 hodinami) a spustí se nabíjení článku s konstantním proudem. Časový interval je předem nastaven pro danou kapacitu článku, což způsobuje negativní vliv na články s různou kapacitou. Článek s vyšší kapacitou je dříve odpojen, než se zcela nabije a u článku s nižší kapacitou dochází k opačnému problému, a to, že jsou články přebíjeny proudem až do doby ukončení časovačem. Další nevýhodou této metody je, že v případě použití článku s ideální kapacitou, který není zcela vybitý, dochází k jeho dřívějšímu nabití a v další fázi nabíjení se článek začne přebíjet. Metoda je vhodná pro pomalé nabíjení. [12]



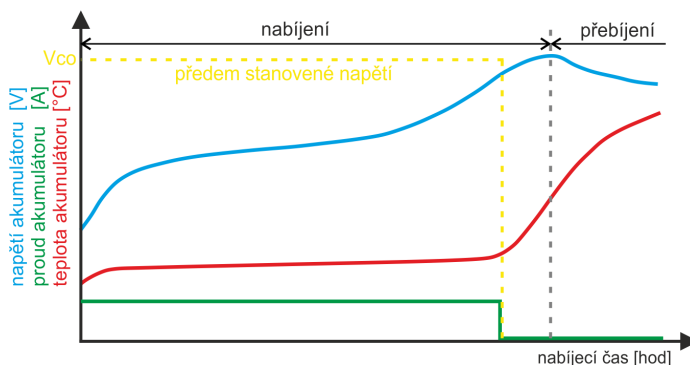
Obr. 3.2 - Metoda časového ukončení

3.3.2 Napětové ukončení

Tuto metodu převážně používají všechny dnešní nabíječky. Princip metody vychází ze znalosti závislosti napětí článku na čase. Tedy přesněji jak se v průběhu nabíjení mění velikost napětí článku.

3.3.2.1 Metoda V_{CO}

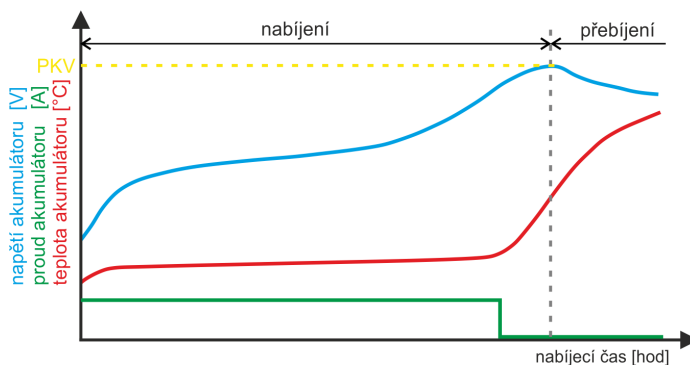
Při nabíjení metodou „ V_{CO} “ je předem stanovené napětí značené V_{CO} (Voltage – Cut Off), a při jeho dosažení je nabíjení ukončeno. Toto napětí je předem dané pro daný akumulátor a stanovuje se většinou podle nabíjecích křivek v katalogových listech. Nevýhoda této metody spočívá v tom, že napětí článku se mění v průběhu nabíjení teplotou, nabíjecím proudem, ale také druhem akumulátoru. Proto se používá pouze jako dodatková metoda k ostatním metodám, a nejčastěji se využívá pro NiCd akumulátory. [12]



Obr. 3.3 - Metoda napětového ukončení V_{CO}

3.3.2.2 Metoda PKV

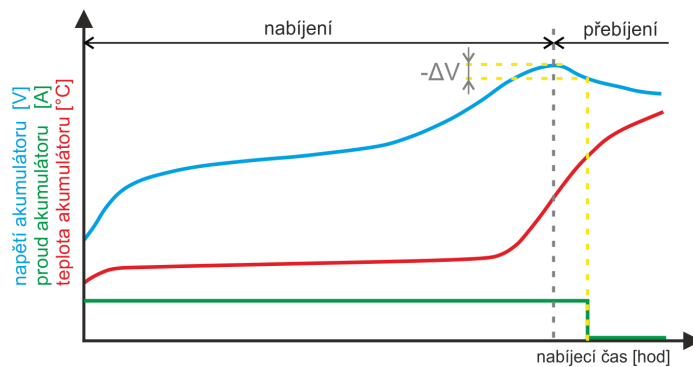
Další metodou napětového ukončení nabíjení je ukončení po dosažení maximálního vrcholu napětí článku, označovaný jako vrchol PKV (Peak Voltage detection – odtud zkratka PKV). Tato metoda se používá pro režim rychlého nabíjení, tedy při nabíjecím proudu $0,5 I_t$ až $2 I_t$. Pro menší proudy se obtížně stanovuje bod PKV (respektive neexistuje). Pro větší proudy je metoda zkreslována zahříváním akumulátoru a následným poklesem napětí v momentě oteplení akumulátoru. [12]



Obr. 3.4 - Metoda napětového ukončení PKV

3.3.2.3 Metoda $-\Delta V$

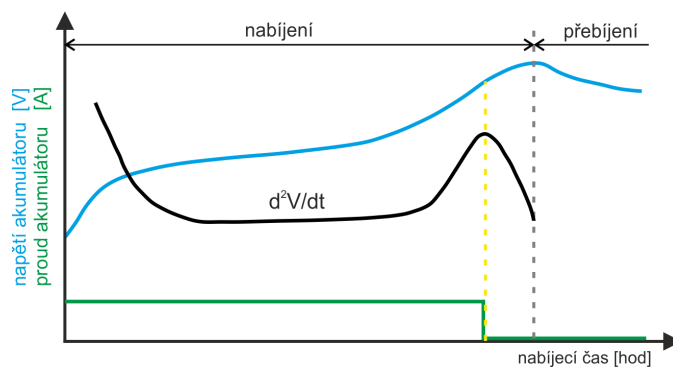
Princip metody je založen na indikaci poklesu napětí během konce nabíjení. Nabíjení se ukončí, když napětí na článku poklesne o 10 mV pro NiCd akumulátory nebo o 5 mV pro NiMH akumulátory. I přestože metoda patří mezi nejrozšířenější, má své nevýhody. Dá se použít jen pro rychlé, popř. zrychlené nabíjení. Při nabíjení nižším proudem než $0,5 I_t$ nedochází k poklesu napětí na konci nabíjení. Při větším proudu než $2 I_t$ dochází k poklesu napětí až poté, co je článek plně nabitý – dochází k přebíjení článku. [12]



Obr. 3.5 - Metoda napětového ukončení $-\Delta V$

3.3.2.4 Metoda d^2V/dt^2

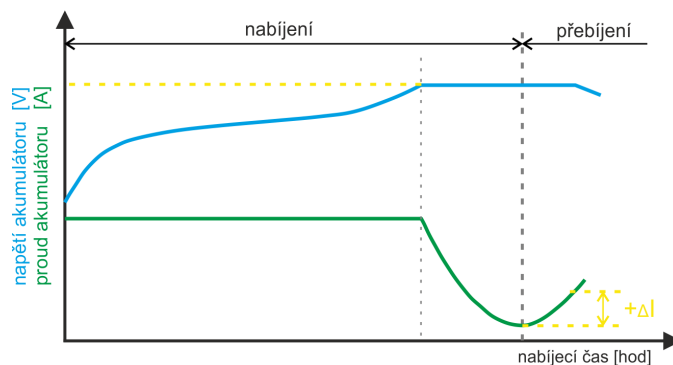
Tato metoda je velmi podobná metodě „ $-\Delta V$ “ a je založena na sledování druhé derivace napětí v čase (d^2V/dt^2). Nabíječ snímá napětovou křivku a zastaví nabíjení v okamžiku zaznamenání napětové derivační špičky. Tato nabíjecí metoda zvyšuje životnost akumulátorových baterií, protože nedochází k přebíjení baterie. [12]



Obr. 3.6 - Metoda napětového ukončení d^2V/dt^2

3.3.3 Proudové ukončení

Akumulátor se nabíjí konstantním proudem, dokud se nedosáhne na akumulátoru předem určeného napětí. Poté přejde nabíjení do režimu nabíjení konstantním napětím. Nabíjení je ukončeno při nárůstu nabíjecího proudu v režimu nabíjení konstantním napětím. Problém s nabíjením může nastat při zvýšené teplotě akumulátoru, tehdy napětí akumulátoru nemusí dosáhnout předem určeného napětí. Tato metoda je podobná metodě „CCCV“, ale u ní nedochází k nárůstu proudu. [12]



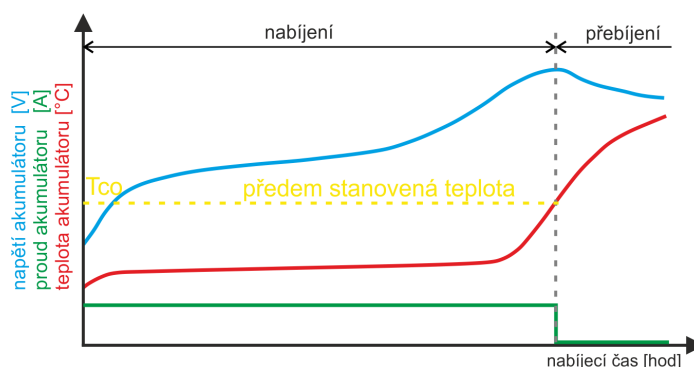
Obr. 3.7 - Metoda proudového ukončení

3.3.4 Teplotní ukončení

Metody teplotního ukončení nabíjení jsou dvě využívající informaci o teplotě, která se získá z NTC termistoru (při zvýšení teploty klesá odpor termistoru). Termistor se umísťuje na plášť akumulátorového článku, jeho poloha je důležitá, aby nedocházelo k nepřesným nebo zpožděným informacím o teplotě akumulátoru. [12]

3.3.4.1 Metoda TCO

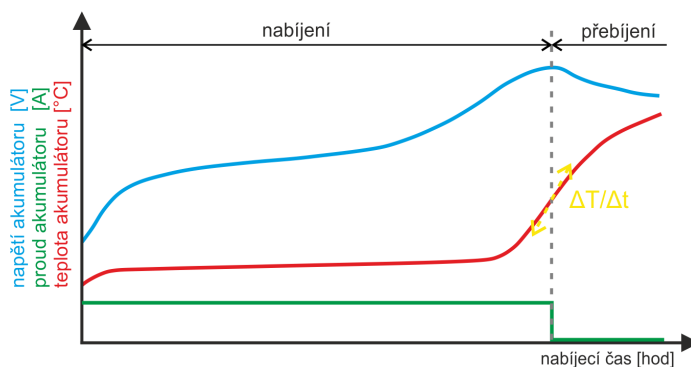
Princip metody „TCO“ (Thermal Cut Off) spočívá v tom, že v okamžiku dosažení předem dané maximální teploty (obvykle 45 °C) se vypíná nabíjecí proud. Metoda je vhodná pro akumulátory do kapacity 2 Ah s nabíjecím proudem 0,5 až 1 I_c , u akumulátorů s větší kapacitou je doporučený nabíjecí proud cca 0,3 I_c . Tento typ není vhodný pro akumulátory s nízkou nebo příliš vysokou teplotou. Při nízké teplotě dochází k přebíjení článků. Naopak při vyšší teplotě se článek nezačne nabíjet vůbec nebo se nenabije na plnou kapacitu. [12]



Obr. 3.8 - Metoda teplotního ukončení TCO

3.3.4.2 Metoda $\Delta T/\Delta t$

Metoda je založena na sledování změny teploty v čase (dT/dt). Nabíjení se ukončí, když dojde během minuty ke změně teploty o 0,5 – 1 °C. Velikost doporučeného nabíjecího proudu při teplotě do 30 °C je 0,3 I_c . Metoda se stává nevýhodnou, pokud dojde k výpadku elektrické energie nebo při nabíjení ještě teplého akumulátoru zahřátého během předchozího nabíjení (nabíječ čeká na další nárůst teploty, aby mohl nabíjení ukončit). [12]

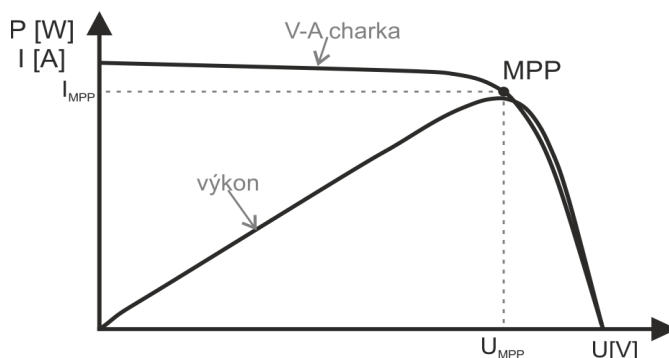


Obr. 3.9 - Metoda teplotního ukončení $\Delta T/\Delta t$

4 Sledování maximálního bodu výkonu panelu a metody MPPT

Sledování bodu maximálního výkonu neboli MPPT (Maximum Power Point Tracking) je důležitou součástí fotovoltaických systémů, protože napomáhá ke zvýšení efektivity přeměny sluneční energie na energii elektrickou. Bod maximálního výkonu MPP (Maximum Power Point) je potřeba sledovat, protože voltampérová charakteristika FV panelu je nelineární (obr. 4.1) a jejich výstupní výkon je závislý na podmínkách prostředí, jako je intenzita osvětlení a teplota. Abychom z FV panelu získávali maximální výkon (maximum energie) je potřeba sledovat a přizpůsobovat bod maximálního výkonu těmto změnám. Hlavním úkolem MPPT regulátorů je automaticky najít napětí U_{MPP} nebo proud I_{MPP} takové, aby byl výkon P_{MPP} dodávaný FV panelu maximální i při měnících se podmínkách. Existuje mnoho metod pro sledování maximálního bodu výkonu, většina těchto metod je schopná reagovat na obě změny podmínek (teploty, intenzity osvětlení). Některé metody mají větší účinnost při konstantní teplotě. Některé metody také reagují na změny způsobené stárnutím FV panelu. Při výběru vhodné metody jsou zohledňovány i tyto rozhodující kritéria:

- složitost řešení,
- požadované snímače,
- rychlost a efektivnost metody,
- náročnost implementace,
- cena.



Obr. 4.1 - Voltampérová charakteristika fotovoltaického panelu

4.1 Metody MPPT

4.1.1 Fractional open – circuit voltage V_{OC}

Metoda open-circuit voltage (napětí naprázdno) využívá téměř lineární závislost napětí U_{MPP} a napětí naprázdno U_{OC} fotovoltaického panelu, jak při změnách teploty, tak i při změnách intenzity ozáření. Tato závislost je daná vztahem:

$$U_{MPP} = k_{OC} \cdot U_{OC}, \quad (4.1)$$

kde k_{OC} je proporcionální konstanta, která se určuje z charakteristiky FV panelu. Hodnotu konstanty je potřeba vypočítat pro různé teploty a intenzity osvětlení. Obvykle se tato hodnota pohybuje v rozsahu 0,71 až 0,78. Velikost napětí U_{OC} se měří periodicky při současném vypnutí připojeného měniče (panel nedodává žádný výkon). Poté co známe konstantu a máme změřené napětí naprázdno, lze dopočítat napětí U_{MPP} dle vztahu 4.1. Je potřeba brát v úvahu, že vztah 4.1 je pouze aproximací, vypočtené U_{MPP} je tedy jen přibližné a panel nikdy nebude pracovat v bodě maximálního výkonu.

Tato metoda konstantního napětí není příliš přesná, ale za to je velmi jednoduchá a levná. Není zapotřebí žádný mikrokontrolér, lze ji sestavit i analogově a stačí měřit jen jedno napětí (jeden napěťový snímač). Nevýhoda této metody se projeví už při částečném zastínění FV panelu, tehdy může docházet ke vzniku lokálních maxim výkonu. [14], [15]

4.1.2 Fractional short – circuit current I_{SC}

Metoda short-circuit current (proud nakrátko) je obdobná metoda jako předchozí, avšak s tím rozdílem, že využívá lineární závislost proudu I_{MPP} a proudu nakrátko I_{SC} . Tato závislost je dána vztahem:

$$I_{MPP} = k_{SC} \cdot I_{SC}, \quad (4.2)$$

kde k_{SC} je proporcionální konstanta, která se určuje z charakteristiky FV panelu. Hodnota konstanty se pohybuje v rozsahu 0,78 až 0,92. Změření hodnoty I_{SC} je obtížnější než u předchozí metody a je potřeba do obvodu zařadit proudový snímač a spínač, který bude periodicky zkratovat FV článek. Měření probíhá ve stavu, kdy FV panel nedodává žádný výkon. Metoda také nepracuje přesně v bodě MPP a pro lepší nalezení MPP lze metody Open – circuit a Short – circuit použít současně. [14], [15]

4.1.3 Perturb and observe (P&O)

Metoda Perturb and Observe (odchýlení a vyhodnocení) patří mezi nejběžněji používané metody MPPT. Princip metody je v algoritmu, který periodicky mění (snižuje nebo zvyšuje) pracovní napětí známým směrem, poté vyhodnotí derivaci výkonu podle napětí a podle znaménka se nastaví směr vychýlení pro další cyklus.

Jestliže metoda vyhodnotí derivaci výkonu podle napětí jako kladnou. Podle podmínky 4.3, je směr změny napětí správný a v následujícím cyklu bude vychýlení pokračovat stejným směrem, aby došlo k dosažení MPP.

$$\frac{dP}{dU} > 0 \quad (4.3)$$

Pokud bude derivace výkonu podle napětí vyhodnocena jako záporná dle podmínky 4.4, tak zvolený směr je špatný a v následujícím cyklu bude pokračovat opačným směrem. Popis chování algoritmu je shrnut v tabulce 4.1.

$$\frac{dP}{dU} < 0 \quad (4.4)$$

Nevýhodou P&O metody je neustálá oscilace kolem MPP nebo při rychlých změnách intenzity ozáření může docházet ke krokům špatným směrem. Existuje několik variant této metody, ale pokaždé je zapotřebí měřit alespoň jedno napětí a pokud připojený měnič neumožňuje měřit proud, tak je potřeba ještě jeden proudový snímač. [14], [15]

Tabulka 4.1 - Popis algoritmu metody P&O

Odchylka napětí	Změna výkonu	Následující odchylka napětí
kladná	kladná	kladná
záporná	kladná	záporná
kladná	záporná	záporná
záporná	záporná	kladná

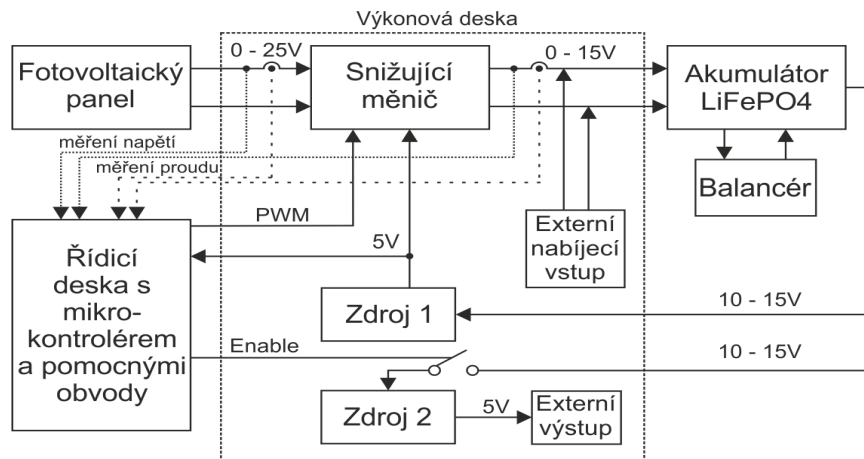
4.1.4 Přehled dalších MPPT metod

Tabulka 4.2 - Přehled MPPT metod (převzato z [14])

Metoda MPPT	Závisí na FV panelu?	Přesný MPP?	Analog x Digitál	Periodické ladění?	Rychlost vyhledávání MPP	Obtížnost řešení	Měřené veličiny
Hill-climbing / Perturb and observe	Ne	Ano	Obě	Ne	Proměnlivá	Malá	Napětí, proud
Incremental conductance	Ne	Ano	Digital	Ne	Proměnlivá	Střední	Napětí, proud
Fractional VOC	Ano	Ne	Obě	Ano	Střední	Malá	Napětí
Fractional ISC	Ano	Ne	Obě	Ano	Střední	Střední	Proud
Fuzzy Logic Control	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Velká	Volitelné
Neutral Network	Ano	Ano	Digital	Ano	Vysoká	Velká	Volitelné
RCC	Ne	Ano	Analog	Ne	Vysoká	Malá	Napětí, proud
Current sweep	Ano	Ano	Digital	Ano	Nízká	Velká	Napětí, proud
DC link capacitor droop control	Ne	Ne	Obě	Ne	Střední	Malá	Napětí
Load I or V Maximization	Ne	Ne	Analog	Ne	Vysoká	Malá	Napětí, proud
DP/d Vor dP/dI feedback control	Ne	Ano	Digital	Ne	Vysoká	Střední	Napětí, proud
Array reconfiguration	Ano	Ne	Digital	Ano	Nízká	Velká	Napětí, proud
Linear current control	Ano	Ne	Digital	Ano	Vysoká	Střední	Intenzita ozáření
IMMP & VMPP computation	Ano	Ano	Digital	Ano	-	Střední	Intenzita ozáření, teplota
State/based computation	Ano	Ano	Obě	Ano	Vysoká	Velká	Napětí, proud
OCC MPPT	Ano	Ne	Obě	Ano	Vysoká	Střední	Proud
BFV	Ano	Ne	Obě	Ano	-	Malá	Žádné
LRCM	Ano	Ne	Digital	Ne	-	Velká	Napětí, proud
Slide control	Ne	Ano	Digital	Ne	Vysoká	Střední	Napětí, proud

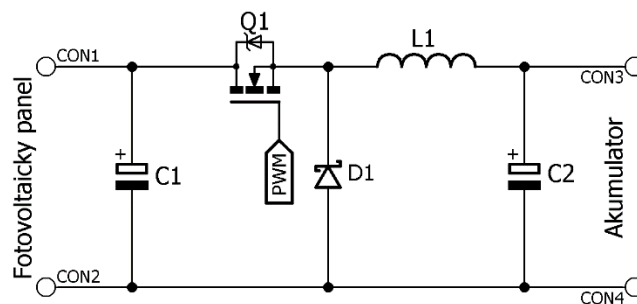
5 Návrh a realizace záložního vícezdrojového systému

Jako první krok pro návrh záložního vícezdrojového systému bylo potřeba se seznámit s jednotlivými prvky systému (fotovoltaický panel, akumulátor, řídicí mikrokontrolér) a podle nich zhotovit návrh celého systému. Jednotlivé prvky jsou popsány dále. Na obr. 5.1 je navrhnuté blokové schéma, na kterém je naznačen princip celého systému.



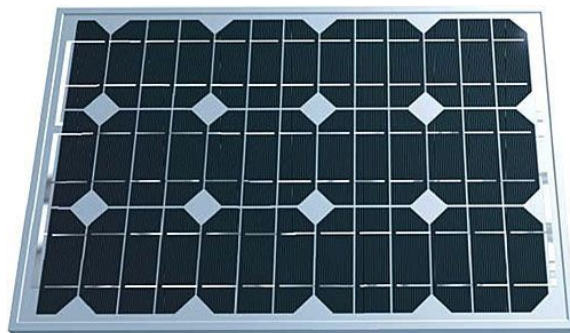
Obr. 5.1 - Blokové schéma návrhu záložního vícezdrojového systému

Po zvážení a konzultaci možných řešení byl pro realizaci vybrán snižující měnič bez galvanického oddělení. Zvolený typ měniče pro tuto úlohu byl také vybrán z důvodu poměrně jednoduchého zapojení, nízkému počtu součástek a dobré účinnosti měniče. Na obr. 5.2 je základní zapojení snižujícího DC/DC měniče. Při návrhu byl brán zřetel na parametry jednotlivých prvků, a také na volbu spínacího kmitočtu, který neovlivňuje jen výběr možných použitelných součástek, ale i přenášený výkon.



Obr. 5.2 - Schéma zapojení snižujícího měniče

- Fotovoltaický panel RS-M50

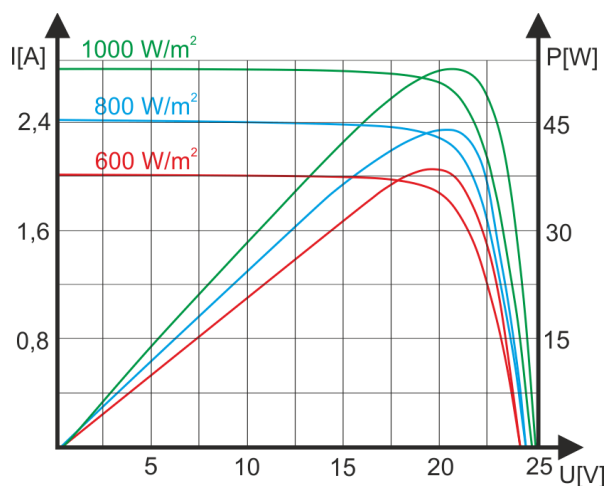


Obr. 5.3 - Fotovoltaický panel RS-M50

Jako vstupní zdroj energie do systému je použit monokrystalický solární panel RICH MODULE RS – M50 o maximálním výkonu 50 W. Potřebné parametry a voltampérová charakteristika panelu jsou vypsány z katalogového listu [16] v tabulce 5.1 a na obr. 5.4.

Tabulka 5.1 - Parametry fotovoltaického panelu RS-M50 [16]

Jmenovitý maximální výkon	50 W
Maximální napětí systému	715 V
Jmenovité napětí	20,2 V
Jmenovitý proud	2,48 A
Napětí naprázdno	24,6 V
Zkratový proud	2,81 A
Pracovní teplota	-45 až +85 °C
Rozměry	685x545x35 mm
Hmotnost	4,4 kg
Parametry získány za standardních testovacích podmínek (STC): intenzita záření 1000 W/m ² , teplota 25 °C.	



Obr. 5.4 - Voltampérová charakteristika panelu RS-M50

- **Akumulátor LiFePO₄**



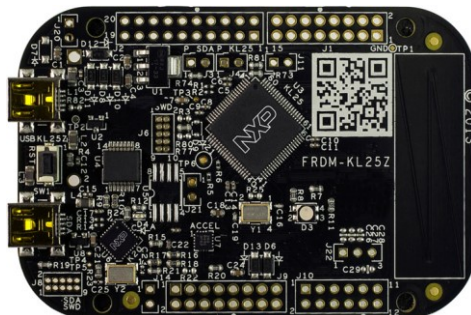
Obr. 5.5 - Akumulátor LiFePO₄ (4 články)

Pro uchovávání energie jsou použity čtyři sériově spojené články LiFePO₄ o celkové kapacitě akumulátoru 40 Ah. Maximální jmenovité napětí na akumulátoru je 12,8 V (článek je 3,2 V), další parametry jsou v tabulce 5.2. [10] Pro zajištění delší životnosti, správného a bezpečného nabíjení je k akumulátoru navrhnout balanční obvod. Balanční obvod hlídá napětí na jednotlivých článcích, čímž zajistí souměrné nabíjení a zabraňuje přebíjení článků.

Tabulka 5.2 - Parametry LiFePO₄ článku

Jmenovité napětí článku	3,2 V
Pracovní napětí	2,5 – 3,65 V
Minimální napětí	2,5 V
Nabíjecí proud	1 – 5 C
Kapacita článku	40 Ah
Počet nabíjecích cyklů	< 2000
Optimální proudová zatížitelnost	0,5
Maximální trvalá teplota	80 °C
Rozměry	116 x 46 x 183 mm

- **Mikrokontrolér FRDM – KL25Z**



Obr. 5.6 - Mikrokontrolér FRDM-KL25Z

Pro řízení celého systému je použit mikrokontrolér FRDM – KL25Z firmy NXP. Jedná se platformu, která je založena na 32 bitovém ARM Cortex – M0+ procesoru s maximální pracovní frekvencí 48 MHz. Disponuje 128 kB flash pamětí, 16 kB SRAM pamětí, full speed USB řadičem, integrovaným sériovým a debugovacím adaptérem s otevřeným standardem (známým jako OpenSDA), tříosým digitálním akcelometrem, RGB LED diodou. Mezi další jeho součástí patří mnoho analogových a digitálních vstupů/výstupů (periferií). Tento kontrolér umožňuje flexibilní napájení zdrojem USB nebo externí zdroj napájení. [17]

5.1 Návrh a realizace snižujícího měniče

5.1.1 Návrh a dimenzování součástek

Při výběru vhodných součástek pro návrh měniče je potřeba dostatečně jednotlivé součástky nadimenzovat, tak aby se napěťově ani proudově nepřemáhaly.

Jako spínací prvek měniče je zvolen unipolární tranzistor MOSFET s N – kanálem typu IRF530NPBF. Tento tranzistor patří mezi rychle spínací tranzistory a má nízký odpor v sepnutém stavu $R_{DS(on)} = 90 \text{ m}\Omega$. Podle katalogového listu snese proudové zatížení $I_D = 17 \text{ A}$ při 25°C . Při teplotě 100°C snese proud $I_D = 12 \text{ A}$. Tranzistor je napěťově dimenzován na $U_{DS} = 100 \text{ V}$, což je dostatečné. Je-li na vstupní straně tranzistor zatěžován maximálním napětím 30 V a v době kdy vede dioda je tranzistor zatížen maximálním napětím z akumulátoru 15 V . Dá se tedy říct, že vybraný tranzistor vyhovuje jak proudově, tak i napěťově a je tedy vhodný pro danou aplikaci.

Pro návrh byla dále vybrána rychlá Schottkyho dioda typu MBR1060. Tato dioda je dimenzována na napětí $U_{RRM} = 60 \text{ V}$ a snese propustný proud $I_{F(AV)} = 10 \text{ A}$ při teplotě $T_C = 125^\circ\text{C}$. Dioda je vyrobená v pouzdře TO-220 takže se bude moct připevnit na chladič.

Jako další prvek měniče se vybírala tlumivka, a výpočet její indukčnosti je popsán v následující kapitole. Tlumivka je dimenzována na vyšší proud, než jaký cívkou poteče, proto aby nedocházelo k přesycování magnetického jádra cívky (s rostoucím proudem procházejícího tlumivkou se zvyšuje magnetický tok).

Na vstup a výstup DC/DC snižujícího měniče jsou použity elektrolytické kondenzátory s nízkým ekvivalentním odporem (Low ESR), které jsou dimenzovány na maximální napětí 35 V . Pro rovnoměrnější rozložení proudu jsou kondenzátory řazeny paralelně.

5.1.2 Výpočet indukčnosti tlumivky

Při výpočtu velikosti tlumivky uvažujeme maximální vstupní napětí $U_1 = 25 \text{ V}$ (napětí panelu naprázdno) a výstupní napětí $U_2 = 15 \text{ V}$ (maximální napětí 4 článků). Proud teče z fotovoltaického panelu přes cívku do zátěže a na cívce vznikne napětí U_L , které lze popsat pomocí Kirchhoffova zákona vztahem (5.1). Postup výpočtu vychází z literatury [18].

$$U_L = U_1 - U_2 \quad (5.1)$$

Vztah (5.3) vychází ze vztahu (5.2) v kterém nahradíme napětí na cívce U_L vztahem (5.1), dále nahradíme Δt za $\delta \cdot T$ (šířku pulzu krát periodu).

$$U_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (5.2)$$

$$L = \frac{U_L \cdot \Delta t}{\Delta I_L} = \frac{(U_1 - U_2) \cdot \delta \cdot T}{\Delta I_L} \quad (5.3)$$

Dobu periody vypočteme ze spínací frekvence podle vztahu (5.4). Frekvence spínání f_s byla zvolena 50 kHz. Šířka pulzu δ (sigma) je poměr mezi sepnutím a vypnutím tranzistoru a nabývá hodnot od nuly do jedné.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50\,000} = 20\,\mu s \quad (5.4)$$

K výpočtu zvlnění proudu je potřeba nejdříve vypočíst proud protékající cívkou. Ze vzorce pro výkon si vyjádříme proud a vypočteme proud dodávaný fotovoltaickým panelem (5.5).

$$I_{PAN} = \frac{P_{PAN}}{U_{PAN}} = \frac{50}{20,2} = 2,48\,A \quad (5.5)$$

Rovnici (5.5) upravíme pro výstupní proud, tak že napětí nastavíme na výstupní hodnotu.

$$I_2 = \frac{P_{PAN}}{U_2} = \frac{50}{15} = 3,33\,A \quad (5.6)$$

Zvlnění proudu na cívce určíme z výstupního proudu I_2 a koeficientu k , který se doporučuje volit 0,2.

$$\Delta I = k \cdot I_2 = 0,2 \cdot 3,33 = 0,66\,A \quad (5.7)$$

Dosazením vypočtených a zvolených hodnot do vzorce (5.3) nám vyjde indukčnost tlumivky 300,3 μH .

$$L = \frac{U_L \cdot \Delta t}{\Delta I_L} = \frac{(U_1 - U_2) \cdot \delta \cdot T}{\Delta I_L} = \frac{(25 - 15) \cdot 1 \cdot 20 \cdot 10^{-6}}{0,66} = 300,3\,\mu H \quad (5.8)$$

Do návrhu byla použita tlumivka firmy Feryster s označením DTMS-47/0,33/10, která má indukčnost 330 μH a je dimenzována na proudové zatížení 10 A.

5.1.3 Návrh a výpočet chladiče

Pro zvolený tranzistor a diodu je potřeba vypočíst celkové ztráty (spínací ztráty a ztráty při vedení) z nichž vypočteme jaký má být tepelný odpor chladiče, který využijeme pro výběr správného chladiče. Při výpočtu budeme počítat s malou rezervou jak u napětí na tranzistoru ($U_d = 30\,V$), tak i u procházejícího proudu ($I_d = 4\,A$) při spínací frekvenci $f_s = 50\,kHz$. Pro výpočty je potřeba z katalogových listů (Datasheetu) zjistit níže uvedené parametry, jak pro tranzistor IRF530NPBF [19], tak i pro diodu MBR1060 [20].

Tabulka 5.3 - Parametry tranzistoru a diody z katalogového listu [19] [20]

	Tranzistor IRF530NPBF		Dioda MBR1060
$t_{d(on)}$ [ns]	9,2	U_F [V]	0,8
$t_{d(off)}$ [ns]	35	R [mΩ]	-
R_{DS} [mΩ]	90	T_j [°C]	150
T_j [°C]	175	T_a [°C]	35
T_a [°C]	35	$R_{th\ j-c}$ [°C/W]	3
$R_{th\ j-c}$ [°C/W]	2,15	$R_{th\ c-h}$ [°C/W]	0,3
$R_{th\ c-h}$ [°C/W]	0,3		

Výpočet spínacích ztrát na tranzistoru:

$$P_{T(SW)} = \frac{(t_{d(on)} + t_{d(off)}) \cdot U_d \cdot I_d \cdot f_s}{2} = \frac{(9,2 + 35) \cdot 10^{-9} \cdot 30 \cdot 4 \cdot 50 \cdot 10^3}{2} = 0,133\ W. \quad (5.9)$$

Výpočet ztrát tranzistoru při vedení:

$$P_{Tcond} = I_{dRMS}^2 \cdot R_{DS} = 4^2 \cdot 0,09 = 1,44\ W. \quad (5.10)$$

Výpočet celkových ztrát na tranzistoru:

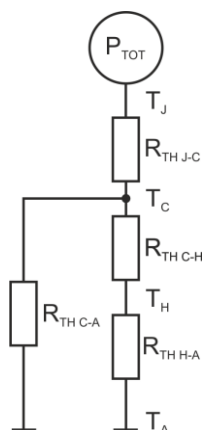
$$P_{T\ TOT} = P_{T(SW)} + P_{Tcond} = (0,133 + 1,44) = 1,57\ W. \quad (5.11)$$

Výpočet ztrát na diodě při vedení:

$$P_{Dcond} = I_D \cdot U_F = (4 \cdot 0,8) = 3,2\ W. \quad (5.12)$$

Výpočet spínacích ztrát na Schottkyho diodě můžeme zanedbat kvůli zanedbatelnému zotavovacímu času. Tedy celkový ztrátový výkon diody je roven vodivostním ztrátám $P_{Dcond} = P_{D\ TOT}$.

Z vypočteného celkového ztrátového výkonu můžeme vypočíst tepelný odpor chladiče. Obecný vzorec (5.13) vychází z náhradního tepelného schématu (viz obr. 5.7).



- P_{TOT} – celkový ztrátový výkon
- T_J – teplota přechodu
- $R_{TH\ J-C}$ – tepelný odpor přechod – pouzdro
- T_C – teplota pouzdra
- $R_{TH\ C-H}$ – tepelný odpor pouzdro – chladič
- T_H – teplota chladiče
- $R_{TH\ H-A}$ – tepelný odpor chladič – okolí
- T_A – teplota okolí
- $R_{TH\ C-A}$ – tepelný odpor pouzdro – okolí

Obr. 5.7 - Náhradní schéma tepelných přechodů

$$\Delta T = \sum R_{TH} \cdot P_{TOT} \quad (5.13)$$

Z obecného vzorce (5.13) si vyjádříme tepelný odpor chladiče pro tranzistor $R_{T\ TH\ H-A}$ a pro diodu $R_{D\ TH\ H-A}$:

$$R_{T\ TH\ H-A} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{T\ TOT}} - (R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h}) = \frac{175 - 35}{1,57} - (2,15 + 0,3) = 86,7\ ^\circ C/W, \quad (5.14)$$

$$R_{D\ TH\ H-A} = \frac{T_{jmax} - T_a}{P_{D\ TOT}} - (R_{th\ j-c} + R_{th\ c-h}) = \frac{150 - 35}{3,2} - (3 + 0,3) = 32,6\ ^\circ C/W. \quad (5.15)$$

Jelikož obě součástky připevníme na jeden chladič vypočteme celkový tepelný odpor jako paralelní kombinaci jednotlivých tepelných odporů:

$$R_{TH\ H-A} = \frac{R_{T\ TH\ H-A} \cdot R_{D\ TH\ H-A}}{R_{T\ TH\ H-A} + R_{D\ TH\ H-A}} = \frac{86,7 \cdot 32,6}{86,7 + 32,6} = 23,7\ ^\circ C/W. \quad (5.16)$$

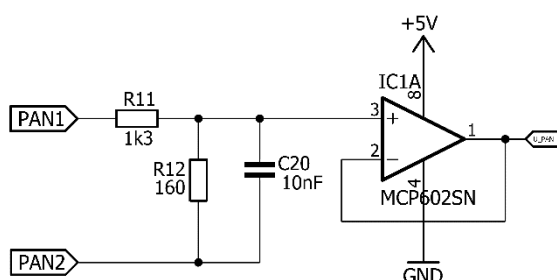
Zvolený chladič musí mít tepelný odpor menší nebo roven 23,7 °C/W. Zvolen byl hliníkový chladič s žebrováním (žebrování nezahrnuto do výpočtu plochy chladiče) a rozměry 49 x 2(9) x 52 mm. Pro ověření, zdali vybraný chladič bude stačit je možné provést výpočet podle vzorce (5.17). Námi vypočtený tepelný odpor zvoleného hliníkového chladiče vyšel menší než námi požadovaný, takže jej můžeme pro chlazení obou součástek použít.

$$R_{th\ h-a} = \frac{3,3}{\sqrt{\lambda \cdot d}} \cdot C^{0,25} + \frac{650}{S} \cdot C = \frac{3,3}{\sqrt{2,1 \cdot 2}} \cdot 0,85^{0,25} + \frac{650}{55} \cdot 0,85 = 11,59\ ^\circ C/W, \quad (5.17)$$

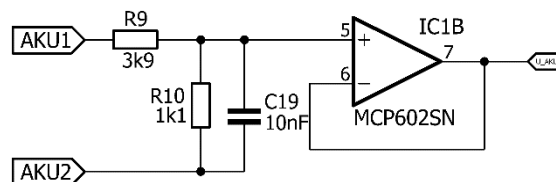
kde S je plocha chladiče [cm^2], λ je tepelná vodivost materiálu chladiče (hliník 2,1), d je tloušťka chladiče [mm] a C je korekční faktor polohy chladiče (0,85 má svislé umístění chladiče s hladkým povrchem).

5.1.4 Měření vstupního a výstupního napětí

K měření napětí na vstupu měniče (na panelu) a k měření napětí na výstupu měniče (na akumulátoru) je provedeno prostřednictvím děliče napětí, který je přiveden na operační sledovač. Při výpočtu děliče se pro vstupní napětí měniče počítalo s měřícím rozsahem 0 až 30 V a pro výstup z měniče s rozsahem 0 až 15 V, které by odpovídali výstupu děliče 3,3 V, jenž můžeme přivést na vstup mikropočítače. Pro optimálnější navržení děliče, tzn. pro nízký proud tekoucí děličem a výběru rezistorů z řady E24 byl použit jednoduchý program „Výpočet kombinací odporů v 1.3“. [21] Z několika výpočtů programu byly zvoleny hodnoty rezistorů následně: $R9 = 3k9$, $R10 = 1k1$, $R11 = 1k3$, $R12 = 160R$.



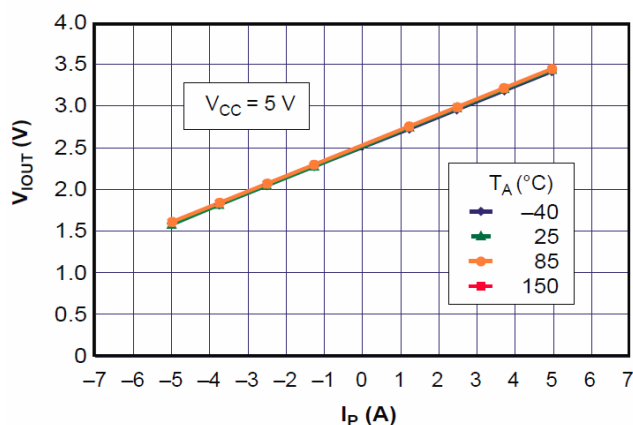
Obr. 5.8 - Schéma vstupního měření napětí (panelu)



Obr. 5.9 - Schéma výstupního měření napětí (akumulátoru)

5.1.5 Měření vstupního a výstupního proudu

K měření vstupního proudu (proudu tekoucího z panelu) a výstupního proudu (proud tekoucí z nebo do akumulátoru) je použit proudový senzor ACS712ELCTR-05B-T. Senzor potřebuje ke svému fungování 5 V napájení a je schopen měřit proud od -5 A do 5 A. Výstupnímu napětí senzoru odpovídá měřený proud zobrazený na obr. 5.10. [22]



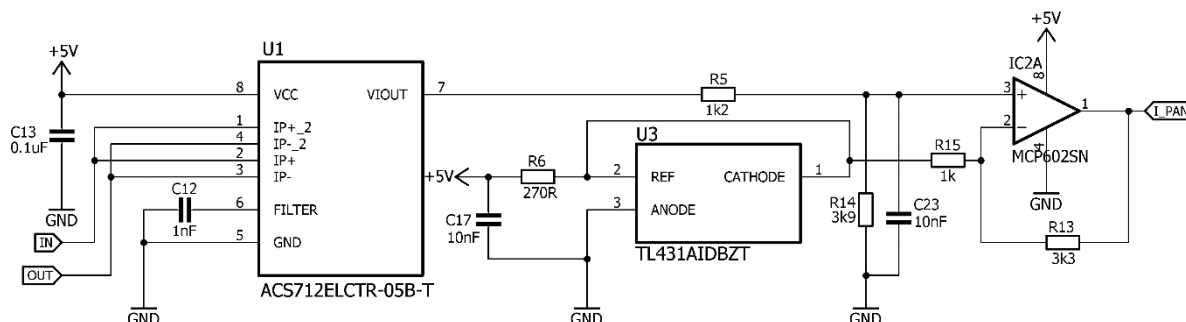
Obr. 5.10 - Závislost výstupního napětí na měřeném proudu proudového senzoru (převzato z [22])

Měření vstupního a výstupního proudu je trochu odlišné v tom, že na vstupu měříme jen proud tekoucí z fotovoltaického panelu a na výstupu měříme proud tekoucí do baterie, ale i proud tekoucí z baterie. Na vstupu budeme měřit proud v rozsahu 0 až 5 A, kterému odpovídá výstupní napětí snímače od 2,5 V do 3,5 V. Toto výstupní napětí musí být optimalizováno pro vstup A/D převodníku mikropočítače, který je v rozsahu 0 V až 3,3 V. Přizpůsobení pro vstupní měření je provedeno rozdílovým zesilovačem, ke kterému se zapojila na invertující vstup operačního zesilovače napěťová reference 2,5 V typu TL431. Takže při výstupním napětí 3,5 V ze senzoru je na výstupu operačního zesilovače 1 V, proto musíme nadimenzovat rozdílový zesilovač tak, aby tato hodnota napětí odpovídala maximálnímu napětí vstupu A/D převodníku (3,3 V). Rezistory R_{14} a R_{15} jsou zvoleny a rezistory R_5 a R_{13} byly dopočteny podle vzorců (5.18 a 5.19).

$$R_{13} = A \cdot R_{15} = 3,3 \cdot 1000 = 3,3 \text{ k}\Omega \quad (5.18)$$

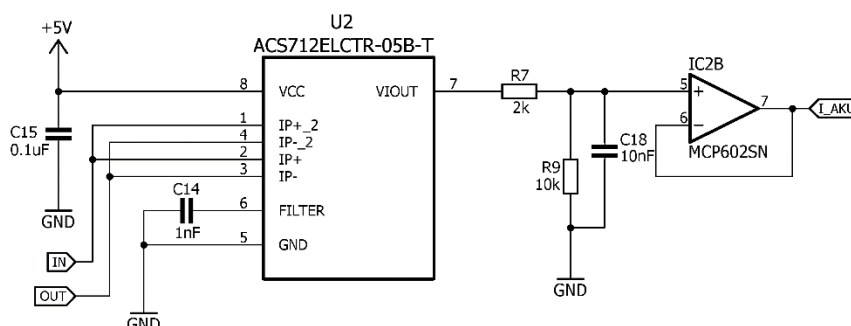
$$R_5 = \frac{R_{14}(R_{15} + R_{13})}{A \cdot R_{15}} - R_{14} = \frac{3900 \cdot (1000 + 3300)}{3,3 \cdot 1000} - 3900 = 1181,8 \Omega \quad (5.19)$$

Hodnoty rezistoru byly zvoleny z řady E24 a to $R_{14} = 3,9 \text{ k}\Omega$, $R_{15} = 1 \text{ k}\Omega$ a vypočtené hodnoty odpovídají $R_{13} = 3,3 \text{ k}\Omega$ a pro $R_5 = 1,2 \text{ k}\Omega$. Celkové schéma měření vstupního proudu je na Obr. 5.11.



Obr. 5.11 - Schéma měření vstupního proudu

Na výstupu se bude proud měřit v obou polaritách, takže výstupní napětí ze senzoru se bude pohybovat v maximálních hodnotách od 1,5 V do 3,5 V. V tomto případě stačí výstupní napětí ze snímače přivést přes napěťový dělič na sledovač napětí, který se připojí na vstup A/D převodníku. Schéma pro měření výstupního proudu je na obr. 5.12.

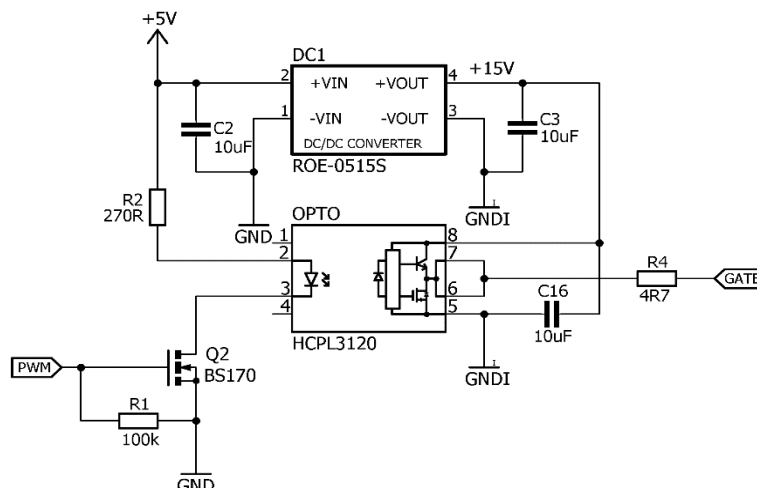


Obr. 5.12 - Schéma měření výstupního proudu

5.1.6 Návrh budicího obvodu tranzistoru

K spínání tranzistoru je zapotřebí navrhnut budící obvod. Jako budící obvod byl vybrán integrovaný budič typu HCPL-3120. [23]

Tento budič má galvanické oddělení vstupu od výstupu optočlenem a v zapojení potřebuje dvě stejnosměrná napětí 5 V a 15 V. Pro zvýšení stejnosměrného napětí z 5 V na 15 V je použit kompaktní zvyšující DC/DC měnič typu ROE-0515S. Z mikropočítače je řídicí signál PWM přiveden na řídicí elektrodu G (Gate) tranzistoru MOSFET a v době sepnutí se sepne i optočlen, který budí výkonový tranzistor IRF530NPBF. Celkové schéma zapojení budiče je na obr. 5.13.



Obr. 5.13 - Schéma budicího obvodu

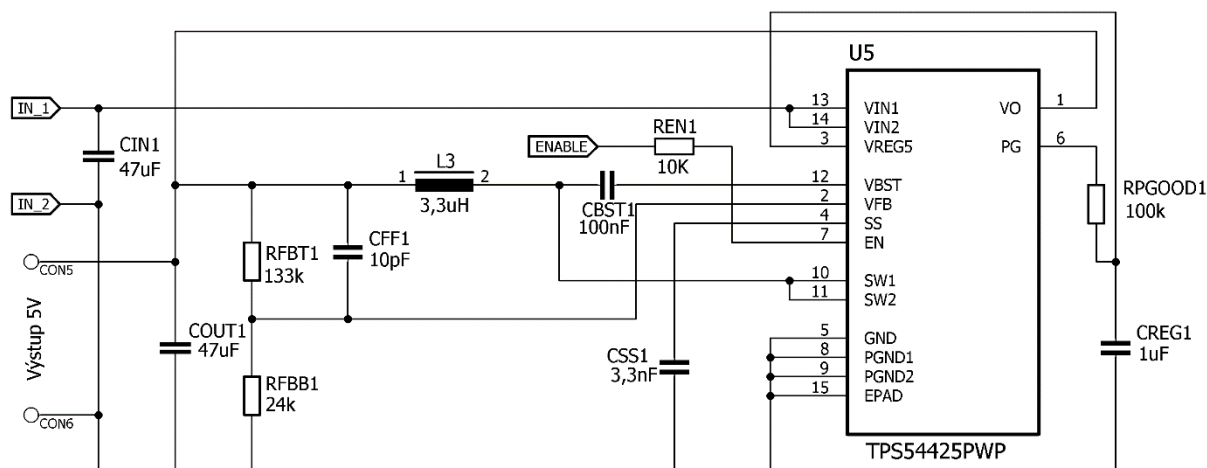
5.2 Návrh a simulace 5 V zdrojů

5.2.1 Návrh 5 V zdrojů

Vstupní stejnosměrné napětí pro oba zdroje je z akumulátoru 15 V (maximálně) a výstupní větev má napětí 5 V s maximálním odběrem proudu 2 A. Rozdíl mezi oběma zdroji je v tom, že jakmile se k výkonové desce připojí akumulátor, tak se první zdroj hned sepne a slouží k napájení mikrokontroléru a obvodů na výkonové desce měniče. Druhý zdroj se spíná pomocí mikropočítače přes vstup enable. Návrh je pro oba zdroje stejný, jen je jinak zapojen vstup enable.

Návrh zapojení stejnosměrného zdroje byl proveden pomocí nástroje Webench Designer od firmy Texas Instruments. [24] Byl vybrán snižující měnič TPS54425 [25], který svými parametry vyhovoval zadání. Tento zdroj má také dobrou účinnost. Výše uvedený nástroj umí vypočítat hodnoty jednotlivých součástek, a také umí základní simulace navrhovaného obvodu.

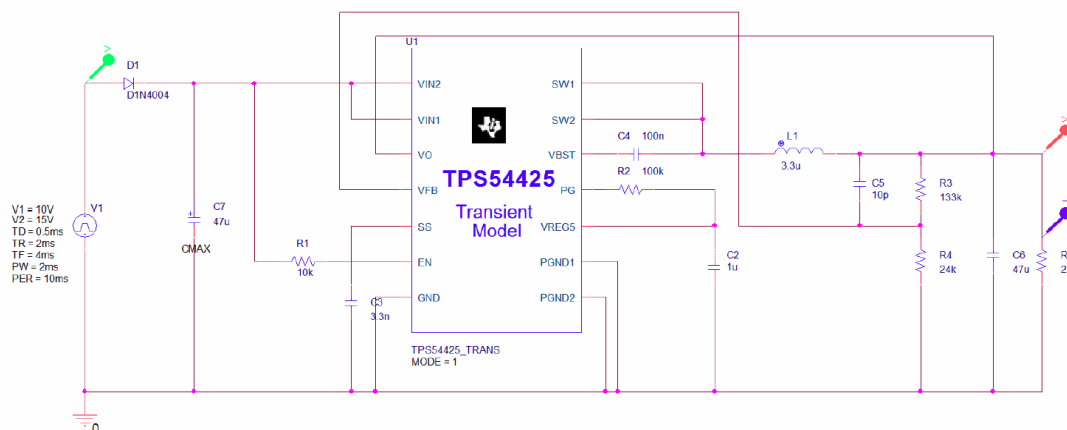
U použitého synchronního snižujícího měniče TPS54425 se může na vstup přivést vstupní napětí od 4,5 V do 18 V. Výstupní napětí se pohybuje v rozsahu od 0,76 V do 5,5 V při maximálním odběru 4 A. [25] Pro naši aplikaci je nastaveno vstupní napětí 10 až 15 V a výstupní napětí na 5 V při maximálním odběru 2 A. Na obr. 5.14 je navrhnuté a nadimenzované schéma zdroje.



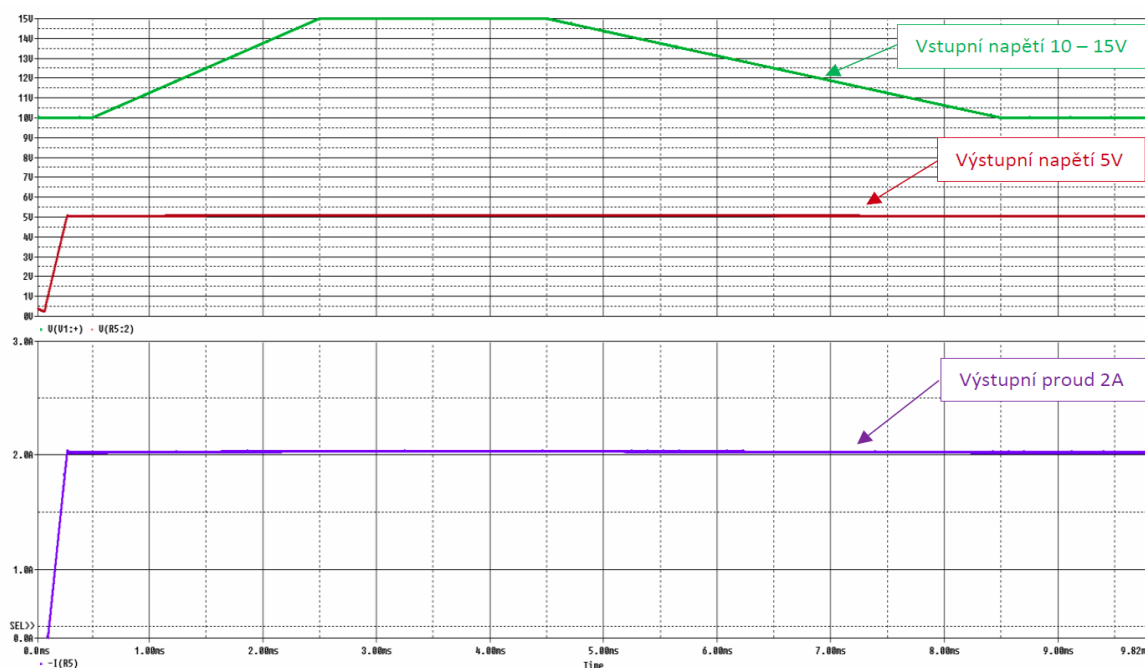
Obr. 5.14 - Schéma zapojení 5 V zdroje

5.2.2 Simulace zdroje v OrCAD PSpice

Navrhovaný obvod krom simulace v dříve zmiňovaném nástroji (Webench Designer) je také namodelován v programu OrCAD PSpice (obr. 5.15). Na obr. 5.16 vidíme průběh simulace kde vstupní napětí (zelená) se pohybuje od 10 V do 15 V a výstupní napětí (červená) drží stále 5 V bez kolísání nebo závislosti na vstupním napětí i při trvalém odběru proudu 2 A.



Obr. 5.15 - Model 5 V zdroje v prostředí OrCAD PSpice



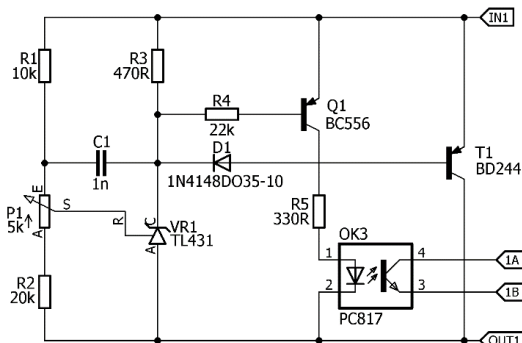
Obr. 5.16 - Průběh simulace

5.3 Návrh a realizace balančního obvodu

Balanční obvod neboli omezovač je speciální obvod, který je určený pro zlepšení kvality nabíjení a tím i k prodloužení života akumulátoru. Tento obvod chrání články před přebitím, umožňuje u sériově zapojených článků nabíjet celou sadu najednou aniž by došlo k přebití jakéhokoliv z článků. [26]

Na obr. 5.17 je schéma zapojení pro jeden článek, návrh balančního obvodu je složen ze čtyř takovýchto obvodů pro každý článek jeden. Kladný potenciál článku se připojí na svorku IN1 a záporný pól na svorku OUT1. Pomocí potenciometru P1 je nastavena napěťová reference VR1 na hodnotu

maximálního napětí na článku (3,6 V). Jakmile dojde ke zvýšení napětí na článku nad povolenou mez, tak tranzistor T1 se více otevře a přebytečná energie začne přecházet do dalšího článku, tím se zabrání jeho přebíjení. Svorky 1A a 1B jsou připojeny k mikrokontroléru, na kterém se vyhodnocuje jestli je článek nabit nebo ne.



Obr. 5.17 - Schéma zapojení balančního obvodu pro jeden článek

5.4 Schémata zapojení a plošné spoje

Pro nakreslení schémat a návrh desek plošných spojů je použit program EAGLE 8.0.1 (Easily Applicable Graphical Layout Editor) od firmy Autodesk.

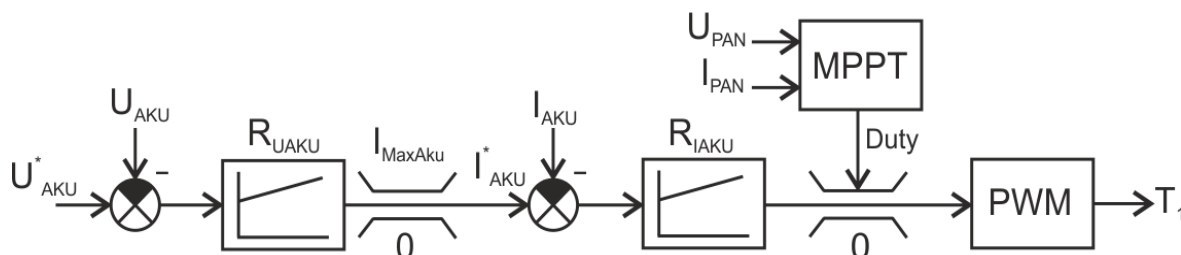
Kompletní schéma zapojení výkonové desky (skládající se ze snižujícího měniče, 5 V zdrojů, měření proudu a napětí, budicího a pomocných obvodů), náhledy desky plošného spoje (horní – TOP, spodní – BOTTOM, rozmístění součástek, seznam součástek – PARTLIST) jsou v příloze 1. Schéma úplného balančního obvodu, náhledy DPS a seznam součástek jsou v příloze 2.

5.5 Realizace softwaru pro mikrokontrolér

Algoritmus softwaru pro řízení systému je programován ve vyšším jazyce C v programovém prostředí Kinetis Design Studio 3 od firmy NXP. Pro ladění aplikace je využíván nástroj FreeMaster od firmy FreeScale Semiconductors.

Na obr. 5.18 je regulační blokové schéma, které graficky naznačuje algoritmus řešený v hlavním programu (aplikace.c – zdrojový soubor, v příloze 6).

Žádané napětí na akumulátoru U_{AKU}^* se porovnává se skutečným napětím U_{AKU} a vstupuje do PI regulátoru napětí baterie. Z regulátoru vychází žádaný proud akumulátoru I_{AKU}^* , který je omezen nastaveným maximálním proudem I_{MaxAku} , který může téct do baterie. Následuje porovnání žádaného proudu I_{AKU}^* a skutečného proudu akumulátoru I_{AKU} a tato odchylka vstupuje do PI regulátoru proudu akumulátoru z něhož vstupuje do bloku PWM (pulzně šířkové modulace), která spíná výkonový tranzistor T1. Střída PWM modulace je omezena blokem MPPT, který ze vstupních veličin napětí panelu U_{PAN} a proudu z panelu I_{PAN} , hledá maximální bod výkonu panelu.

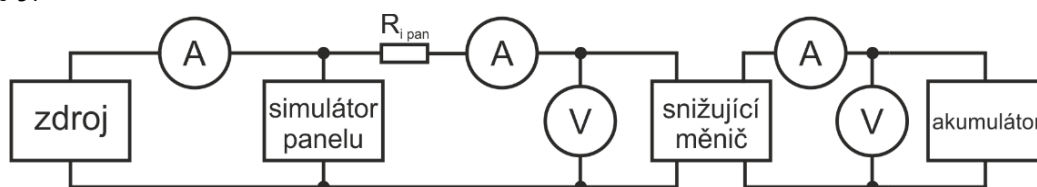


Obr. 5.18 - Regulační blokové schéma

6 Měření

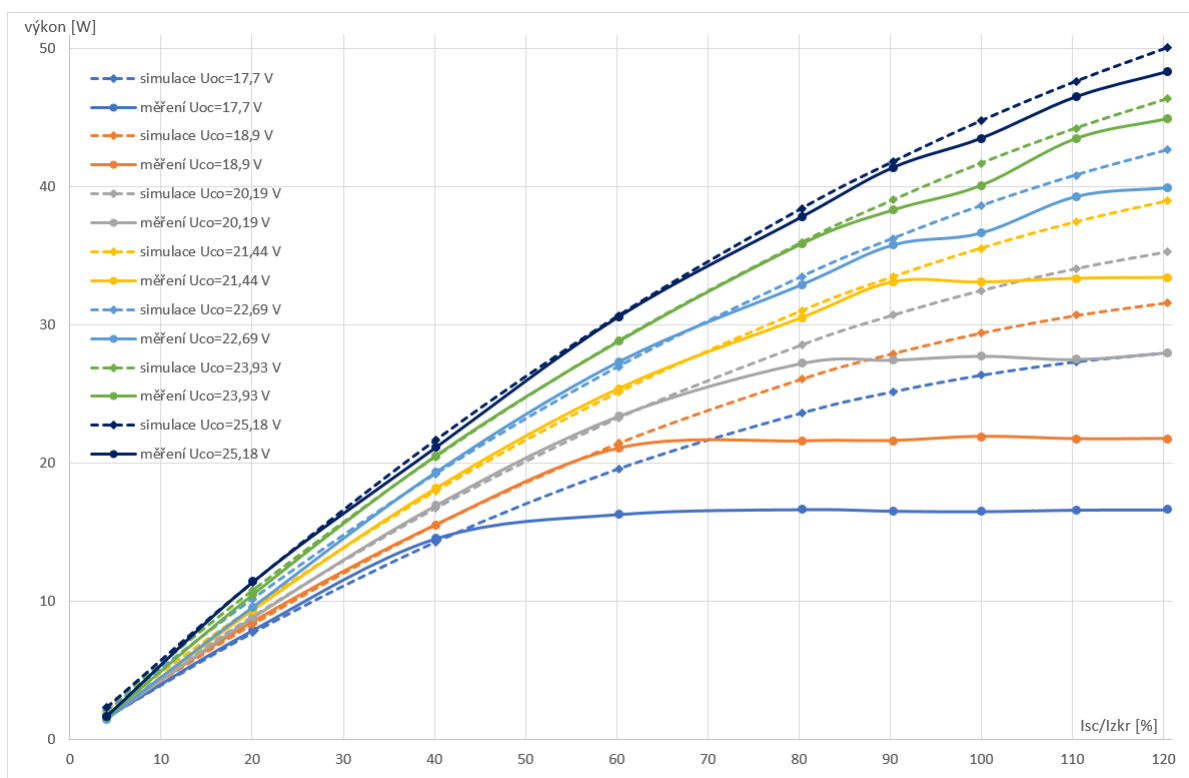
K ověření funkčnosti a správného chování realizovaného zařízení bylo zapotřebí vyrobit simulátor FV panelu (viz příloha 3). Díky simulátoru bylo dosaženo rychlejšího a rozsáhlejšího ověření. Na simulátoru FV panelu můžeme nastavit, jak proud, který teče z panelu pomocí připojeného zdroje proudu (je závislý na intenzitě slunečního záření), tak i napětí na panelu, které je možné nastavit pomocí potenciometru R4. U navrženého náhradního schématu FV panelu je potřeba provést simulaci (ukázka simulace zobrazena v příloze 3), jejíž výsledky slouží k porovnání s naměřenými hodnotami. Na základě tohoto porovnání zjistíme, zda zařízení funguje správně.

Na obr. 6.1 je zobrazeno schéma zapojení, sloužící pro ověření funkčnosti zařízení. Proudovým zdrojem na vstupu byl nastavován zkratový proud panelu, na simulátoru FV panelu bylo nastaveno napětí naprázdno. Na vstupu i výstupu snižujícího měniče byl měřen proud i napětí, z kterého se vypočetl vstupní, výstupní výkon a účinnost měniče. Tabulka s naměřenými a vypočtenými hodnotami je v příloze 5.



Obr. 6.1 - Schéma zapojení pro ověření funkčnosti zařízení

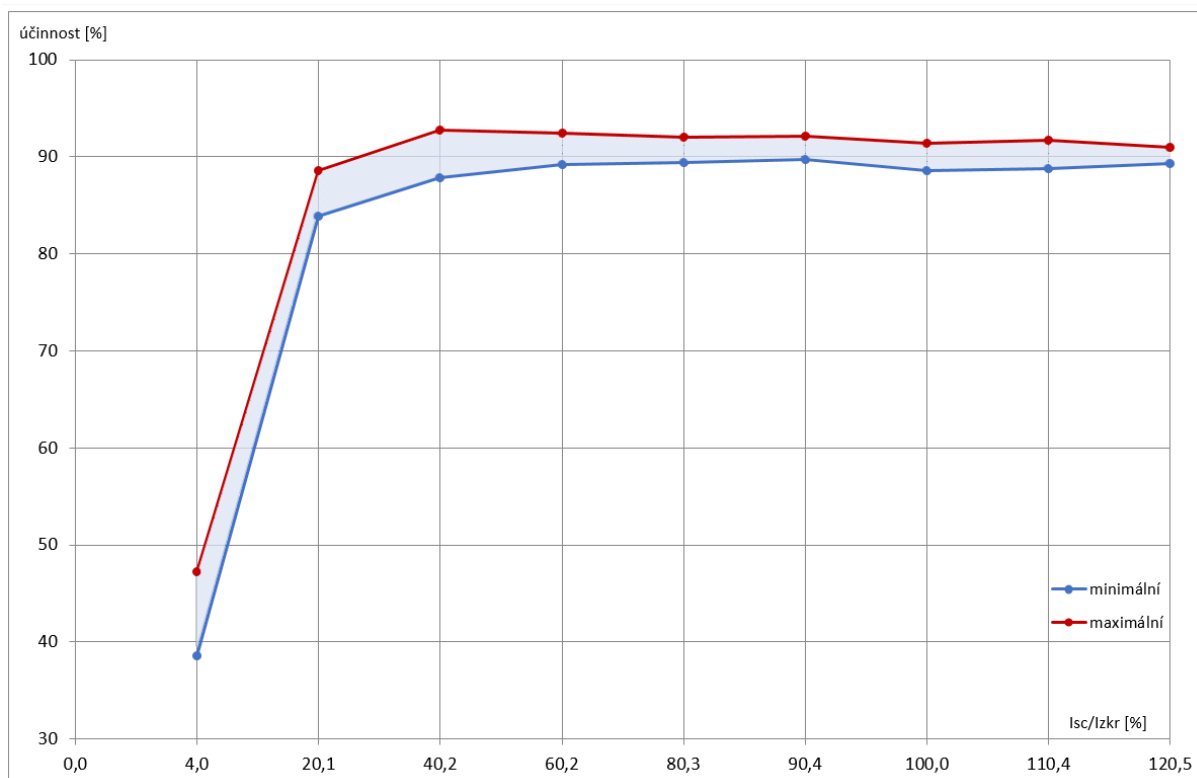
Na obr. 6.2 je zobrazeno porovnání naměřeného a simulovaného maximálního bodu výkonu pro 7 různých hodnot napětí naprázdno.



Obr. 6.2 - Grafické porovnání měřeného a simulovaného maximálního bodu výkonu

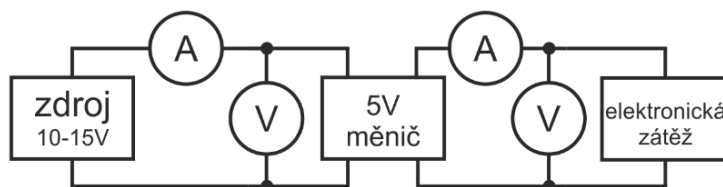
V grafu je možné vidět správnou funkci měniče. Změřené výkony se přibližují k ideálním simulovaným výkonům, což dokazuje že MPPT regulátor našel maximální bod výkonu. V případech kdy bylo nastaveno nízké napětí naprázdno (např. $U_{oc} = 17,7 \text{ V}$) vidíme, že od 60 % poměru nastaveného proudu ku zkratovému, je naměřená křivka téměř vodorovná. Toto je zapříčiněno omezením napěťového regulátoru, který neumožňuje nastavení nižšího napětí, než je napětí 4 článků akumulátoru (14,4 V).

Z naměřených hodnot byla vypočtena účinnost měniče, která je zobrazena na obr. 6.3. Z grafu vyplývá, že účinnost snižujícího měniče se pohybuje přibližně kolem 90 % v závislosti na nastaveném napětí a zkratovém proudu.



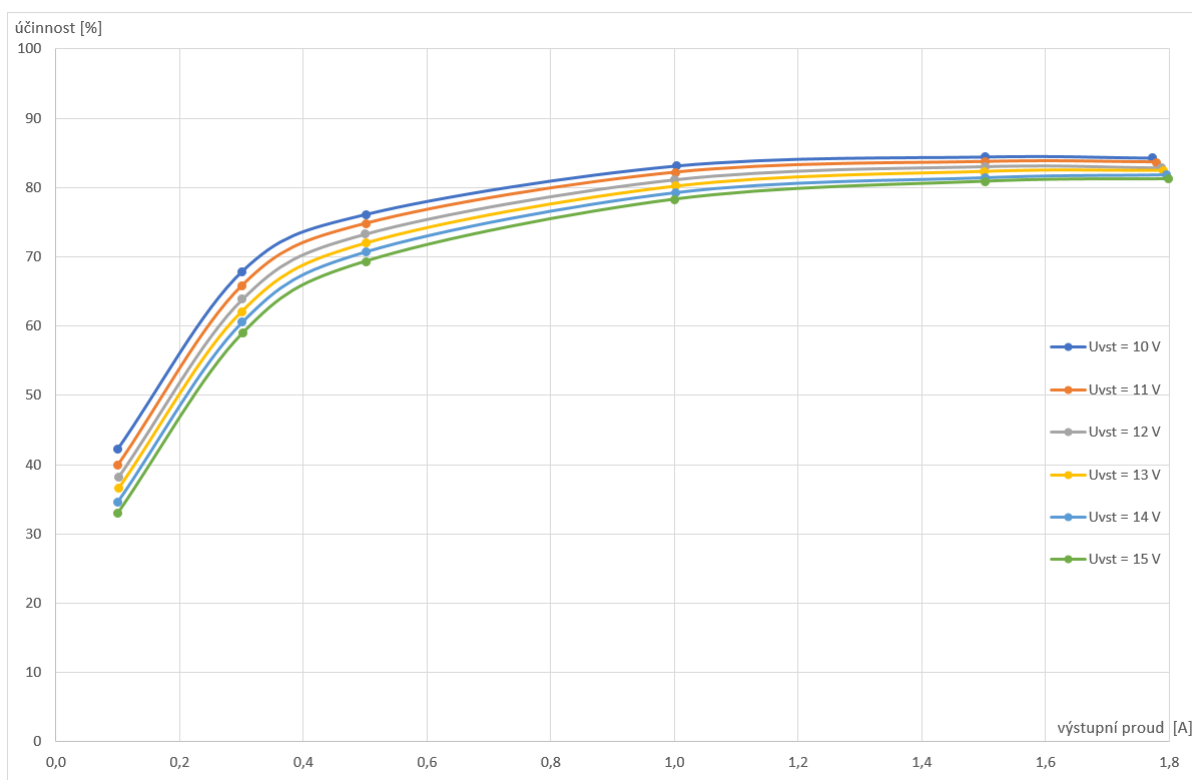
Obr. 6.3 - Graf účinnosti snižujícího měniče

Dále byla změřena účinnost 5 V zdroje, podle zapojení na obr. 6.4. Vstupní napětí pro měnič bylo nastaveno od 10 V do 15 V, měnič byl zatížen elektronickou zátěží od 0,1 A do 1,8 A. Tabulka s naměřenými hodnotami je v příloze 5.



Obr. 6.4 - Schéma zapojení pro měření účinnosti 5 V zdroje

Na obr. 6.5 je vyobrazený graf účinnosti, z kterého vidíme že při odebírání jednoho a více ampér je účinnost přes 80 %.



Obr. 6.5 - Graf změřené účinnosti 5 V zdroje pro různá vstupní napětí

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo nejprve provést teoretický rozbor možností nabíjení akumulátoru z fotovoltaických panelů. Dále navrhnout, vybrat vhodné součástky a sestavit vícezdrojový záložní napájecí systém s fotovoltaickým panelem, který je řízený mikropočítačem. Poté ověřit funkčnost celého zařízení pomocí měření.

Teoretická část byla věnována konstrukčním prvkům systému, jako jsou fotovoltaické panely, stejnosměrné měniče a akumulátory. Dále nejčastěji používaným typům akumulátorů a jejich metodám nabíjení. V poslední části teoretického rozboru byly popsány vybrané metody sledování maximálního bodu výkonu panelu (MPPT).

Praktická část obsahovala návrh jednotlivých částí a realizaci záložního napájecího systému. Řešila se zde volba a dimenzování jednotlivých součástek, výpočet tlumivky snižujícího měniče, výpočet potřebného chladiče, návrh budícího obvodu a řešení měření vstupního a výstupního proudu a napětí. Následoval návrh a simulace 5 V zdrojů a balančního obvodu, který slouží ke zlepšení kvality nabíjení akumulátoru. V poslední části byla provedena realizace navrženého zařízení.

Pro ověření funkčnosti vyrobeného zařízení a otestování správného chování programu bylo provedeno měření. Z důvodu nepříznivých klimatických podmínek a také i časové náročnosti byl reálný fotovoltaický panel nahrazen jeho simulátorem. Nastavením proudu u připojeného zdroje k simulátoru a nastavením napětí pomocí potenciometru lze simulátorem napodobovat chování reálného panelu (s nízkou intenzitou záření klesá proud panelu a s rostoucí teplotou panelu klesá jeho napětí). Dále byla provedena simulace v programu OrCad PSpice, abych naměřené hodnoty měl s čím srovnat. Z porovnaných výsledků lze říct, že zařízení funguje správně. Vykazuje malé odchylky v hledaném maximálním bodu výkonu, které jsou způsobeny ideálními součástkami, podmínkami při simulaci a chybou měření. U snižujícího měniče byla změřena účinnost pohybující se kolem 90 %. Zdroje dodávající 5 V napájení mají účinnost v rozsahu od 70 % do 85 % v závislosti na odebíraném proudu.

Přínosem práce pro mne bylo získání většího přehledu o široké nabídce součástek, které jsou v dnešní době k dostání. Seznámil jsem se s mikrokontrolérem FRDM – KL25Z, jeho vlastnostmi a možnostmi nastavení. Získal jsem znalosti v oblasti programování mikrokontroléru v prostředí Kinetis Design Studio 3 a ladění kódu programu v nástroji FreeMaster. Vyzkoušel jsem si i simulaci jednotlivých částí návrhu zařízení v programu OrCad PSpice.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] *Fotovoltaika pro každého: Česká agentura pro obnovitelné zdroje energie* [online]. 2009 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika>
- [2] LIBRA, Martin a Vladislav POULEK. *Solární energie: fotovoltaika - perspektivní trend současnosti i blízké budoucnosti*. 1. vyd. V Praze: ČZU, 2005. ISBN 8021313358.
- [3] Charakteristika: Vzdělávací portál ČEZ. *Svět energie* [online]. 2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/sluncni-elektrarny/charakteristika>
- [4] MURTINGER, Karel, Jiří BERANOVSKÝ a Milan TOMEŠ. *Fotovoltaika, elektřina ze slunce*. 1. vyd. Brno: ERA, 2007. 21. století. ISBN 9788073661007.
- [5] *INTERACTIVE: What Makes Up a Solar Panel?* [online]. 2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/what-makes-up-solar-panel.html>
- [6] Velmi pružné a ohebné solární panely PowerFilm SOLAR. *Automatizace.hw.cz* [online]. 1997-2014 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/velmi-pruzne-a-ohebne-solarni-panely-powerfilm-solar>
- [7] VALA, Zbyněk. *Fotoluminiscenční metody detekce defektů solárních článků: Solar cells photoluminescence defect detection methods*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Diplomová práce.
- [8] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. 1. vyd. Praha: BEN, 2001. ISBN 8073000458.
- [9] CHLEBIŠ, Petr. *Výkonové polovodičové systémy: Učební texty pro kombinované a distanční studium*. Ostrava: VŠB - TUO, 2005.
- [10] *Hermetické akumulátory: Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. BATTEX, spol. s r.o, 2009-2017 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=4>
- [11] CENEK, Miroslav. *Akumulátory od principu k praxi*. 1. Praha: FCC Public, 2003. ISBN 8086534030.
- [12] MAREK, Jiří a Luděk STEHLÍK. *Hermetické akumulátory v praxi*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 2004. Elektro (IN-EL). ISBN 8086230341.
- [13] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery systems engineering*. 1. United Kingdom: WILEY (John Wiley & Sons), 2013. ISBN 9781119979500.
- [14] ESRAM, Trishan a Patrick. L. CHAPMAN. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques: IEEE Transactions on Energy Conversion. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2007. DOI: 0885-8969.
- [15] FARANDA, Roberto a Sonia LEVA. Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems. *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*. 2008. DOI: 1790-5060.
- [16] *Katalogový list fotovoltaického panelu RS-M50* [online]. 2008 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.aspa.cz/doc/d/o/c/rs_m50.pdf
- [17] *Uživatelský manuál FRDM-KL25Z* [online]. 2013 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/1884196.pdf?_ga=1.186818280.1777540849.1490002775

- [18] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 8086056910.
- [19] *Katalogový list MOSFET tranzistoru IRF530* [online]. 2004 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/2043010.pdf?_ga=1.150707958.1777540849.1490002775
- [20] *Katalogový list Schottkyho diody MBR1060* [online]. 2009 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.223-104.2.pdf>
- [21] Výpočet kombinací odporů + odporových děličů. *Wwww.tichytomas.info* [Software]. 2008 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: www.tichytomas.info/clanek.php?id=37
- [22] *Katalogový list snímače proudu ACS712ELCTR-05B* [online]. 2006 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.farnell.com/datasheets/64754.pdf?_ga=1.144765556.1777540849.1490002775
- [23] *Katalogový list optočlenu HCPL3120* [online]. 2016 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: http://www.mouser.com/ds/2/678/V02-0161EN_DS_HCPL-3120_2016-03-21-908803.pdf
- [24] *WEBENCH® Design Center: Texas Instruments* [online]. 2016 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://webench.ti.com>
- [25] *Katalogový list spínaného snižujícího DC/DC regulátoru TPS54425PWP* [online]. 2011 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps54425.pdf>
- [26] *Omezovač napětí pro nabíjení Li-Ion a Li-Pol článků II.* [online]. 2004 [cit. 2017-04-12]. Dostupné z: <http://zajic.cz/omezovac/omezovac.htm>

Seznam příloh

Příloha 1: Výkonová deska	I
Příloha 2: Balanční obvod	V
Příloha 3: Simulátor fotovoltaiického panelu	VIII
Příloha 4: Fotodokumentace	X
Příloha 5: Měření – tabulky naměřených a vypočtených hodnot	XII
Příloha 6: Kód programu	XV